

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Caracterização de Silício por Fotoluminescência e Electroluminescência: Implementação de um Sistema de Medida

José Carlos Videira Madeira

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2011

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Caracterização de Silício por Fotoluminescência e Electroluminescência: Implementação de um Sistema de Medida

José Carlos Videira Madeira

Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de

Prof. Doutor João Serra (FCUL)

Prof. Doutor Killian Lobato (FCUL)

Agradecimentos

Chegado á parte dos agradecimentos é que uma pessoa se depara com o facto de que está terminada a etapa da Dissertação do Mestrado.

Dando início a este pequeno texto de agradecimentos, deparo-me com a dificuldade em escrever o mesmo. Acho eu ser importante e sei que a pessoa em questão, no momento da defesa vai refutar este agradecimento, mas tem de ser feito, ao Professor Jorge Maia Alves que me resgatou do caos que a Engenharia Física estava a ficar e me recebeu de braços abertos neste Mestrado, além de que foi quem me falou inicialmente sobre a possibilidade de participar neste projecto. Agradecer também ao Professor João Serra por ser o responsável do projecto e me ter dado a oportunidade de me integrar no mesmo, e pois está claro de ser um dos meus orientadores para esta dissertação. Um agradecimento a todos os elementos do grupo do departamento de energia da faculdade que sempre foram impecáveis, onde o David Pêra se encontra em destaque por ter sido um grande amigo e um grande colega sempre disponível a debater ideias e a ajudar, á Filipa Reis que na parte do desenvolvimento do sistema de EL teve a cortesia de me facultar um conjunto de células relativos a um projecto seu para utilizar no desenvolvimento desta dissertação, ao Ivo Costa que foi uma mais-valia na discussão de ideias e acima de tudo graças ao que me ensinou a nível de trabalho de oficina. Quanto ao grupo de energia da faculdade fica a faltar somente o meu orientador Killian Lobato que foi crucial e impecável no desenrolar do projecto, agradeço acima de tudo aquilo que aprendi neste ultimo ano desde as áreas científicas mais diversas até aos métodos de trabalho mais eficientes, saindo muito enriquecido desta relação.

Abstract

There has been an increasing use of renewable energy systems in our planet. Replacing the old energy sources for renewable ones is inevitable. The process has already begun with hydroelectric power plants and wind power plants. Solar energy is extremely vast and free to be consumed and there lies the importance of solar photovoltaic technology with the hope of a fast transition to this type of renewable energy source.

The development of solar photovoltaic technology lies on the improved quality of materials processing, which implies the development of improved diagnostic techniques. Characterization techniques based on steady-state luminescence images have recently emerged as powerful, fast and precise tools in the development of high efficient silicon solar cells. A technique, based on luminescence imaging for characterization of solar cells throughout their construction-phases, is presented in this thesis.

In order to perform characterization through photoluminescence techniques, an experimental system was developed and together with software routines created with MatLab being capable of processing the images obtained by photoluminescence.

To be able to obtain a comparative method with a similar technique, our system underwent some changes so as to allow for characterization via electroluminescence. The MicroWave Photoconductivity Decay (μPCD) was employed as a comparative and validation technique for the determination of minority carrier lifetimes.

The results demonstrate that Photoluminescence and Electroluminescence techniques are valid tools in the development and optimization with the benefit of facile integration in an industrial environment.

Key Words

Solar Energy, Solar Photovoltaic, Characterization Technics, Photoluminescence and Electroluminescence.

Resumo

Os sistemas de energia renovável têm vindo a ter uma utilização crescente no nosso planeta. A substituição das fontes de energia não renováveis por fontes renováveis tornou-se inevitável. O processo de substituição das fontes energéticas já começou com as grandes centrais hidroelétricas, centrais eólicas entre outras. A energia do Sol é extremamente abundante e livre para ser consumida, e é aí que a tecnologia do fotovoltaica entra, e onde existe grande esperança de uma transição mais célere para um sistema energético renovável.

O desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica está assente na melhoria da qualidade do processamento de materiais, o que implica necessariamente o desenvolvimento de técnicas de diagnóstico. Técnicas de caracterização baseadas em imagens obtidas por fotoluminescência e eletroluminescência de estado estacionário emergiram recentemente como ferramentas poderosas, rápidas e precisas no desenvolvimento de células solares de silício de alta eficiência. Nesta tese é apresentada uma técnica de caracterização, baseada em luminescência, capaz de uma caracterização em todas as suas fases de construção, de células fotovoltaicas.

Implementou-se um sistema experimental de caracterização através da técnica de fotoluminescência, elaborando-se rotinas no software MatLab de maneira a otimizar e processar as imagens obtidas por fotoluminescência.

É ainda feita uma adaptação do nosso sistema para a técnica de eletroluminescência, de maneira a se obter um estudo comparativo com uma técnica semelhante, tudo no mesmo sistema. Além da análise de eletroluminescência e fotoluminescência, fez-se uma análise comparativa com outra técnica de caracterização, baseada no decaimento da fotocondutância com recurso a micro-ondas (μPCD – MicroWave Photoconductivity Decay).

Os resultados alcançados demonstraram que a técnica de fotoluminescência é uma excelente ferramenta no desenvolvimento e optimização de novas técnicas laboratoriais e com enorme potencial no ramo industrial.

Palavras-chave:

Energia Solar, Solar fotovoltaico, técnicas de caracterização, fotoluminescência e eletroluminescência.

Índice

Abstract	i
Resumo	ii
Palavras-chave:.....	ii
1. Introdução.....	1
1.1 Energias Renováveis no Mundo	2
1.1.1 PV no Mundo e em Portugal	4
1.2 Recurso e Tecnologias Solares	5
1.3 Tecnologia Fotovoltaica	7
1.3.1 Materiais Semicondutores	7
1.3.2 Interação da radiação com os Semicondutores	9
1.3.1 Absorção de Radiação	14
1.3.2 Geração e perfil de distribuição de Portadores	16
1.3.3 Movimentação das Cargas Portadoras.....	18
1.3.4 Efeito de Recombinação.....	18
1.3.5 Funcionamento de uma célula solar	24
1.3.6 Tecnologias Fotovoltaicas	30
1.3.7 Caracterização da Tecnologia.....	36
2. Sistema Experimental.....	58
2.1 Estrutura Fotoluminescência	61
2.1.1 Fonte de Iluminação	62
2.1.2 Tubo de Luz.....	65
2.2 Estrutura Eletroluminescência.....	66
2.2.1 Fonte de Corrente/Tensão.....	66
2.2.2 Contactos metálicos.....	66
2.3 Estrutura Partilhada	67

2.3.1	Caixa Estanque	67
2.3.2	Porta amostra	68
2.3.3	LED – Iluminação Externa	68
2.3.4	Fotodetector - Camera CCD	69
3.	Testes de Optimização	71
3.1	Divergência e Homogeneidade da iluminação	71
3.2	Detecção de Luz Parasita	74
3.3	Focagem	76
3.4	Análise aos filtros e a sua influência na luminescência	80
3.5	Rácio de diferentes imagens de luminescência	83
3.6	Software de Tratamento de Dados	86
4.	Resultados Experimentais	89
4.1	μ PCD – Micro-WavePhotoconductivityDecay	90
4.2	Fotoluminescência	91
4.3	Eletroluminescência	94
5.	Conclusão	97
6.	Bibliografia	99
7.	Anexos	101
7.1	Anexo I	101
	Coeficiente de Absorção do Silício	101
7.2	Anexo II	102
	Perfil de Distribuição de Portadores de Carga	102
7.3	Anexo III	105
	Data Sheet da camera HR-320	105
7.4	Anexo IV	107
	Thermistor-Steinhart Equation	107
7.5	Anexo V	108

Data Sheet do Laser.....	108
7.6 Anexo VI.....	109
Data Sheet dos óculos de protecção	109
7.7 Anexo VII.....	110
Data Sheet da fonte do laser	110
7.8 Anexo VIII	111
Desenho da caixa estanque.....	111
7.9 Anexo IX	114
Data Sheet dos Filtros.....	114

Lista de Siglas e Acrónimos

Símbolo	Unidade	Descrição (Português)	Descrição (Inglês)
AC		Corrente Alterna	Alternating Current
ADCs		Conversor de Analógico para Digital	Analog to Digital Converters
Ag		Prata	Silver
Al		Alumínio	Aluminium
AM		Massa Ar	Air Mass
$\alpha - Si$		Silício amorfo	Amorphous Silicon
CCD		Dispositivo de Carga Acoplada	Charge Coupled Device
CdS		Sulfureto de Cádmio	Cadmium Sulfide
CdTe		Telureto de Cádmio	Cadmium Telluride
d	m	Espessura da amostra	Sample thickness
D_e	$cm^2 s^{-1}$	Coefficiente de difusão	Diffusion Coefficient
DC		Corrente Contínua	Direct Current
E	eV	Energia	Energy
EL		Eletroluminescência	Eletroluminescence
E_C	eV	Energia do nível da banda de condução	Conduction band energy level
E_G	eV	Energia do hiato	Energy band gap
E_V	eV	Energia do nível da banda de valência	Valence band energy level
EQ		Eficiência Quântica	Quantum Efficiency
FF		Factor de Forma	Fill Factor
GaAs		Arsenieto de Gálio	Arsenieto de Gálio
Ge		Germanio	Germanium
H		Hidrogénio	Hydrogen
He		Hélio	Helium
I	A	Corrente Elétrica	Electric Current

IEA		Agência Internacional de Energia	International Energy Agency
I_S	A	Corrente de saturação	Saturation Current
I_{SC}	A	Corrente de curto-circuito	Short circuit current
InP		Fosforeto de Índio	Indium Phosphide
IV		Infravermelho	Infrared
J_{SC}	cm^{-3}	Densidade de corrente em circuito	Short circuit current density
LBIC		Corrente Induzida por raio laser	Light Beam Induced Current
Le		Comprimento de Difusão	Difusion Length
LED		Díodo Emissor de Luz	Light Emitting Diode
LPF		Filtro-Passa-Alto	Long-Pass-Filter
Mono-Si		Monocristalino	Monochyistaline
Multi-Si		Multicristalino	Multichrystaline
n_e ou n	cm^{-3}	Densidade de electrões	Electron density
n_0	cm^{-3}	Densidade de electrões em equilíbrio térmico	Electron density in thermal-equilibrium
Ne		Neon	Neon
p	cm^{-3}	Densidade de buracos	Hole density
R_{Auger}	cm^3/s	Taxa de recombinação de Auger	Auger recombintation rate
R_R	cm^3/s	Taxa de recombinação radiativa	Radiative recombination rate
R_{SRH}	cm^3/s	Taxa de recombinação de SRH	SRH recombination rate
REN		Rede de Políticas de energias renováveis	Renewable Energy Policy Network
p_0	cm^{-3}	Densidade de electrões em equilíbrio térmico	Hole density in thermal-equilibrium
PC		Computador Portátil	Portable Computer
PL		Fotoluminescência	Photoluminescence
PV		Fotovoltaico	Photovoltaic
QSS		Estado Quase-Estacionário	Quasi Steady-Sate
S_r	cm/s	Velocidade de recombinação á superfície	Surface recombination velocity

Si		Silício	Silicon
SPF		Filtro-Passa-Baixo	Short-Pass-Filter
SRH		Shockley-Read-Hall	Shockley-Read-Hall
SS		Estado estacionário	Steady-State
t	s	tempo	time
T	Kelvin	Temperatura	Temperature
TR		Estado Transiente	TransientState
U	cm^3/s	Taxa de recombinação	Recombination rate
UV		Ultra violeta	Ultraviolet
V	V	Tensão	Potential
Wp		Watt-Pico	Watt-Peak
x	m	Espessura da amostra	Sample t
σ	$\Omega^{-1}cm$	Condutividade	Conductivity
ρ	Ωcm	Resistividade	resistivity
λ	nm	Comprimento de onda	wavelength
λ_c	nm	Comprimento de onda de corte	Cut-offwavelength
η_{PV}	%	Rendimento da conversão PV	PV Efficiency
	Hz	Frequência	frequency
τ_{AUGER}	μs	Tempo de recombinação de Auger	Auger recombination time
τ_{Rad}	μs	Tempo de recombinação radiativo	Radiative recombination time
τ_{Rad}	μs	Tempo de recombinação superficial	Superficial recombination time
τ_{SRH}	μs	Tempo de recombinação de SRH	SRH recombination time
Δn	cm^{-3}	Excesso de densidade de electrões	Electron densityexcess
μW -PCD		Decaimento da fotocondutância por detecção de micro-ondas	Microwave-Photocondutance Decay

Lista de Figuras

Figura 1 – Quota de energia renovável no consumo de energia final mundial em 2009,[1]	2
Figura 2 - Metas de incorporação de renováveis no consumo de energia final na EU-27 em 2020[1]... 3	3
Figura 3 – Taxas de crescimento médias anuais das capacidades das energias renováveis e produção de biocombustíveis a nível mundial[1].	3
Figura 4 – Capacidade mundial instalada de tecnologia solar fotovoltaica.[1].....	4
Figura 5 - Massa de ar atravessada pela radiação de ar.....	6
Figura 6 - Espectro Solar com um $AM=0$ e $AM=1.5$, em função do comprimento de onda da irradiância.....	6
Figura 7 - Condutividades típicas de diferentes materiais associados a cada classe[7]	7
Figura 8 – Parcela da tabela periódica onde podemos ver a azul os semicondutores mais conhecidos.[8]	8
Figura 9 - Excitação de um electrão na banda de condução de um metal pela absorção de um fóton com energia $h\nu$, e a consequente perda da energia de excitação por geração de um fonão.....	9
Figura 10 - Excitação de um electrão da banda de valência para a banda de condução de um semiconductor, através da absorção de um fóton. Casos para diferentes energias de fóton.....	10
Figura 11 – Espectro solar e o aproveitamento da radiação pelo silício[9].....	11
Figura 12 - Esquema em equilíbrio termodinâmico da junção $p-n$. Fora da região de depleção o campo eléctrico não tem efeito.	12
Figura 13 - Bandas de energia na junção $p-n$, zona de depleção delimitada pela zona a tracejada e a direcção do campo eléctrico na junção.....	12
Figura 14 - Gráfico IV de um díodo ideal. Equação de Shockley.....	13
Figura 15 - Absorção, reflexão e transmissão de fótons com diferentes comprimentos de onda numa célula fotovoltaica.[11].....	14
Figura 16 - Coeficiente de Absorção de vários materiais semicondutores, medidos a 300K e em função do comprimento de onda em vácuo da luz.[8]	15
Figura 17 -Perfil de distribuição dos portadores minoritários ao longo da espessura da amostra. Perfil elaborado para uma injeção de 1×10^{16} portadores, velocidade de recombinação superficial de 100cm/s , coeficiente de difusão de $30\text{cm}^2/\text{s}$ e uma amostra de espessura $300\text{ }\mu\text{m}$	17
Figura 18 - Os três mecanismos de recombinação no <i>bulk</i> de um semiconductor.....	19
Figura 19 - Tempos de vida dos três mecanismos de recombinação em função dos portadores em excesso numa amostra de silício tipo- p . [16]	21
Figura 20 - Fenómenos físicos que ocorrem desde a excitação de uma amostra até ao retorno ao ponto de equilíbrio[15].....	23

Figura 21 - Impacto das características da superfície e no comprimento de difusão na probabilidade de recolha de portadores numa célula fotovoltaica.	26
Figura 22 - Eficiência Quântica de uma célula real e as respectivas perdas de eficiência.	26
Figura 23 - Circuito eléctrico equivalente de uma célula fotovoltaica.	27
Figura 24 - Curva IV (azul) e de potência (verde) de uma célula fotovoltaica[19].	28
Figura 25 - Esquema das perdas resistivas e os fluxos de corrente.	29
Figura 26 - a) Efeito da resistência série; b) Efeito da resistência paralelo na curva I(V) de uma célula solar.[9]	29
Figura 27 - a) Célula de silício monocristalino; b) Célula de silício multicristalino.	31
Figura 28 - Célula de silício de filmes finos com substrato flexível	32
Figura 29 – Evolução dos rendimentos testados em laboratório de diferentes tecnologias fotovoltaicas[22].	34
Figura 30 - Esquema de funcionamento da técnica LBIC.	36
Figura 31 - Esquema de funcionamento da técnica de μ PCD.[18]	37
Figura 32 - Condições de excitação no método estacionário (SS).[23].	39
Figura 33 - Interface de inputs para a parametrização da simulação.	41
Figura 34 - Interface de resultados do PC1D; leitura de 4 resultados para uma única simulação.	42
Figura 35 - Perfil de distribuição de portadores minoritários ao longo da espessura da amostra, variando o tempo de vida de 0.5us a 1000us.	43
Figura 36 - Perfil de distribuição dos portadores minoritários em função da potência injectada do exterior (fotoluminescência).	44
Figura 37 - Perfil de distribuição dos portadores minoritários em função da dopagem (tipo-p) feita na amostra.	44
Figura 38 - Perfil de distribuição de portadores minoritários em função da velocidade de recombinação na superfície traseira.	45
Figura 39 - Perfil de distribuição de portadores minoritários em função da velocidade de recombinação na superfície frontal.	45
Figura 40 - Percurso óptico para diferentes cenários: Percurso directo desde a geração até á superfície de detecção; Percurso com reflexão na superfície traseira até á superfície de detecção.	46
Figura 41 - Perfis normalizados da emissão por fotoluminescência com variaçãodo tempo de vida dos portadores. a) Perfis de emissão resultantes de dez tempos de vida diferentes, variando de 0.5 μ s a 1000 μ s; b) Dois perfis obtidos a partir de tempos de vida muito distintos, 0.5 μ s e 1000 μ s.	48
Figura 42–a)Perfis normalizados da emissão por fotoluminescência com a intercepção da eficiência da camera detectora ;b)Perfil de emissão depois de sujeito á eficiência quântica da camera.	49

Figura 43 - Perfis de emissão por fotoluminescência com variação da velocidade de recombinação dos portadores na superfície traseira da amostra. Condições base idênticas às simulações anteriores mas com tempo de vida constante de 10 μ s.....	50
Figura 44 – Interação óptica entre um ponto na amostra e a camera; Ângulo sólido correspondente á radiação captada pela lente emitida da superfície da célula solar.	51
Figura 45 - Perfis de emissão detectados pelo fotodetector da camera em função de diferentes tempos de vida.	52
Figura 46 - Tempo de vida em função da intensidade de emissão de fótons, perfil através de um <i>fitting</i> feito com os dados adquiridos dos perfis de emissão de PL.	52
Figura 47 - Esquema de funcionamento da técnica de eletroluminescência.	54
Figura 48 - Perfil de distribuição de portadores minoritários ao longo da espessura da amostra, variando o tempo de vida de 0.2 μ s a 85 μ s (eletroluminescência)	55
Figura 49 - Perfis normalizados da emissão por eletroluminescência com variação do tempo de vida dos portadores.	55
Figura 50 - Perfis normalizados de emissão por eletroluminescência, depois de ponderado com a eficiência quântica da camera.....	56
Figura 51 - Tempo de vida em função da intensidade de emissão de fótons, perfil através de um <i>fitting</i> feito com os dados adquiridos dos perfis de emissão de EL	57
Figura 52 - Sistema Experimental de Foto e Eletroluminescência. Sendo a superfície de emissão e a de excitação a mesma[24]	58
Figura 53 - Sistema Experimental de Fotoluminescência; excitação da amostra feita na superfície oposta á de medição de luminescência.	59
Figura 54 - Bancada de trabalho do sistema PL e EL.	60
Figura 55 - a) Lasers e respectiva fonte de energia; b) tubo de luz responsável pela transmissão da radiação do laser para a amostra.....	61
Figura 56 - Densidade Óptica dos óculos de protecção da Thorlabs(Anexo VI).	63
Figura 57 - Interface do software de controlo do laser, e do controlo de temperatura do módulo.....	64
Figura 58 - a) Equipamento EL, LED de iluminação externa visível e contactos EL; b) Fonte corrente-tensão de EL.	66
Figura 59 - Caixa estanque inserida no sistema de PL. Entrada da radiação laser na caixa estanque, ocorrência de luminescência e posterior detecção pela camera.	67
Figura 60 - Interior da caixa estanque com uma <i>wafer</i> de silício inserida no porta amostra.	68
Figura 61 – Interface de controlo da camera CCD. Fotoluminescência efectuada numa amostra de silício multicristalino.....	70
Figura 62 - Interface do software de simulação ZEMAX.	71

Figura 63 - Resultados extraídos dos detectores da simulação do ZEMAX. a) Esquema 3D do tubo de luz e a distribuição da radiação laser dentro do tubo; b) Distribuição espacial da irradiância na superfície do detector alvo.	72
Figura 64 - Colunas de dados de irradiância extraídos da distribuição espacial da Figura 63 b).....	73
Figura 65 - Perfil 3D obtido na aquisição de uma imagem do interior da camera sem qualquer excitação da amostra.	74
Figura 66 - Comparativo do perfil 3D no escuro antes e depois da aplicação de um filtro mediana de 2D.a) Antes da aplicação do filtro; b) Depois da aplicação do filtro.	75
Figura 67 - Fotos teste á focagem da camera para uma iluminação natural.....	76
Figura 68 – Eletroluminescência feita numa célula de silício monocristalino, de onde se recolheu dados relativos a 4 pontos específicos da célula: Preto, <i>bus bar</i> , perto <i>bus bar</i> e um ponto luminescente isolado.	76
Figura 69 - Estudo da focagem e abertura do sistema. a) Análise á focagem, eixo do x: posição marcada no anel de focagem (Figura 70); b) Análise á abertura, eixo do x: número de passos do anel de abertura.	77
Figura 70 - Fotografia do canhão da objectiva com a focagem definida como ideal.	78
Figura 71 - Eletroluminescência da célula <i>Narec</i> de referência utilizada para o teste de focagem.....	78
Figura 72 - Perfis de intensidade por pixel para diferentes focagens.	79
Figura 73 - Aplicação de filtros SPF no perfil de emissão normalizado. a) SPF950; b)SPF1000; c) Sem filtro aplicado.	80
Figura 74 – Gráfico comportamental estimado para a intensidade dos três filtros em análise.	81
Figura 75 Gráfico comportamental obtido experimentalmente através da integração de três imagens geradas por PL com diferentes filtros aplicados.....	81
Figura 76 - Perfis de intensidade calculados em função do tempo de vida, sendo cada perfil específico para um determinado filtro.	83
Figura 77 - Perfil teórico calculado do rácio de intensidade em função do tempo de vida absoluto do material.....	84
Figura 78 - Rácio de intensidades obtido a partir de duas imagens geradas por fotoluminescência utilizando dois filtros com comprimentos de onda de corte de 950nm e 1000nm. Imagem obtida por corte da imagem inicial, representando 80% da original.....	84
Figura 79 - <i>Wafer</i> de silício multicristalino utilizada no estudo da técnica de fotoluminescência.	89
Figura 80 - Uma das células <i>narec</i> utilizada durante o desenrolar desta dissertação, sendo utilizada tanto para testes de optimização como para fins industriais.....	90
Figura 81 - Distribuição espacial dos tempos de vida (μ s); a) e comprimentos de difusão (μ m); b) absolutos calculados através dos rácios de intensidade.....	91

Figura 82 - Corte de um lingote de silício e possível localização do corte feito para o lote de onde pertence esta <i>wafer</i>	92
Figura 83 –a) Rácio obtido de duas imagens de PL com filtros de SPF 950nm e SPF 1000 nm. b) Imagem gerada por Fotoluminescência de uma wafer multicristalina com um tempo de exposição de 1200 segundos e com aplicação de um filtro LPF de 900nm.	93
Figura 85 - Imagem gerada por EL de uma célula de silício monocristalino reaproveitada.	94
Figura 86 - Imagem gerada por EL de uma célula <i>narec</i> antes da aplicação da soldadura dos contactos metálicos.....	95
Figura 87 - Imagem gerada por EL de uma célula <i>narec</i> após a aplicação da soldadura dos contactos metálicos.....	95
Figura 88 - Imagem gerada por EL de uma célula <i>narec</i> após a aplicação da soldadura dos contactos metálicos. Célula inutilizada devido aos extensos danos.	96
Figura 89 - Coeficiente de absorção do silício em função do comprimento de onda. Medições experimentais feitas a 300K [12].....	101

Lista de Tabelas

Tabela 1- Aplicações por sector das diferentes energias renováveis.....	2
Tabela 2- Aplicações PV para diferentes dimensões de instalação.....	4
Tabela 3 – Hiatos de energia de alguns materiais semicondutores[9].....	11
Tabela 4 - Principais parâmetros do Laser	62
Tabela 5 - Dimensões do tubo de luz.	65
Tabela 6 - Tabela com os parâmetros mais importantes da camera Si-CCD.	69
Tabela 7– a), b) e c): Tabelas de parâmetros físicos inseridos na simulação ZEMAX.	72
Tabela 8 - Dimensões físicas da célula <i>Narec</i> utilizada no estudo.....	78
Tabela 9– Aplicação do ganho na leitura das imagens. Constantes de conversão do ganho da camera CCD (k).	86
Tabela 10 – Aplicação do <i>binning</i> na leitura das imagens, níveis de saturação dos pixéis.....	87
Tabela 11 - Características físicas da <i>wafer</i> de silício multicristalino.	89
Tabela 12 – Série de dados experimentais do tempo de vida em μs obtida com a técnica de μPCD . ..	90
Tabela 13 - Coeficientes da Equação de Steinhart-Hart.....	107

Lista de Constantes Físicas

Símbolo	Valor	Descrição
B	$1.1 \times 10^{-14} \text{cm}^3/\text{s}$	Coefficiente de recombinação radiativa
c	$2.998 \times 10^8 \text{cm} / \text{s}$	Velocidade da luz no vácuo
C_p	$0.3 \times 10^{-30} \text{cm}^6/\text{s}$	Coefficiente de recombinação Auger para buracos
C_n	$1.1 \times 10^{-30} \text{cm}^6/\text{s}$	Coefficiente de recombinação Auger para electrões
D_n	$0.02586 \mu_n \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	Coefficiente de difusão dos electrões
D_p	$0.02586 \mu_p \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	Coefficiente de difusão dos buracos
$E_G(\text{Si})$	1.12 eV	Energia do hiato do Silício
eV	$1.602 \times 10^{-19} \text{J}$	Electrão-Volt
h	$6.624 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$	Constante de Planck
\hbar	$h/2\pi$	Constante de Planck reduzida
k_b	$1.381 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	Constante de Boltzmann
q	$1.602 \times 10^{-19} \text{C}$	Carga de um electrão
N_C	$2.8 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	Densidade efectiva de estados na banda de condução
N_V	$1.04 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$	Densidade efectiva de estados na banda de valência
n_i	$1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$	Concentração intrínseca de portadores de carga
π	3.1416	Pi
μ_n	$\leq 1400 \text{V}^{-1} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	Mobilidade dos electrões
μ_p	$\leq 450 \text{V}^{-1} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	Mobilidade dos buracos

1. Introdução

A necessidade de mudança do paradigma energético do presente tem vindo a incentivar e a potenciar o desenvolvimento de novas tecnologias baseadas em energia renovável.

Sendo o Sol uma fonte de energia abundante e gratuita, a tecnologia fotovoltaica tem vindo a ser uma aposta cada vez mais forte.

As fontes de energia renováveis, cuja origem é principalmente derivada do vasto potencial da radiação solar, possuem a extraordinária particularidade de serem simultaneamente, as fontes de energia mais antigas e mais modernas usadas pela Humanidade.

A energia solar, quer na forma directa de radiação solar, quer em formas indirectas, como a bioenergia, a água ou o vento, foi a fonte de energia na qual as primitivas sociedades humanas se basearam para sobreviver na Terra. A lenha era usada para obter calor e conforto; a biomassa, para alimentação, tanto humana como a dos animais; o vento, para propulsão dos barcos; a água e o vento, para pôr a trabalhar os moinhos que moíam os cereais.

À medida que a sociedade se ia desenvolvendo, foram-se criando tecnologias capazes de assim aproveitar a energia do sol, da biomassa, da água e do vento, em benefício do bem-estar social. A Revolução Industrial, que teve início em Inglaterra em meados do século XVIII e se expandiu pelo mundo durante o século XIX, marcou um ponto de viragem. Neste contexto de desenvolvimento e grandes alterações nos processos industriais, as vantagens do carvão, o primeiro e o mais poderoso combustível fóssil, tornaram-se uma mais-valia para o progresso da Revolução Industrial. Ao carvão, juntou-se o petróleo, e posteriormente, o gás natural. Estas fontes de energia altamente concentradas, abundantes e baratas foram utilizadas para satisfazer os consumos energéticos crescentes, ao nível das necessidades de calor, energia eléctrica e de combustíveis para o sector dos transportes. Estas energias de base fóssil, hoje em dia representam cerca de três quartos da energia consumida no mundo: carvão, petróleo e gás natural.

No século XX, em particular nas décadas de 70 e 80, período que corresponde ao auge das crises petrolíferas que tiveram como consequência um extraordinário aumento dos preços, a situação começou a mudar novamente. A energia proveniente dos combustíveis fósseis deixou de ser barata, aumentando também as preocupações acerca dos efeitos ambientais nocivos da combustão e, face ao ritmo acelerado de extracção que se estava a praticar, passou a haver mais consciência da natureza finita dos combustíveis fósseis.

No seguimento da Segunda Guerra Mundial, ainda houve a esperança de que a energia nuclear representasse uma fonte barata, abundante e limpa de energia, como uma alternativa aos combustíveis fósseis. Mas pelo contrário, há anos que se verifica um impasse no seu desenvolvimento, motivado, principalmente, por questões de natureza económica, de segurança e dos riscos associados aos resíduos radioactivos.

Os medos gerados acerca da sustentabilidade dos combustíveis fósseis e do nuclear foram o elemento catalisador esperado para renovar o interesse pelas fontes renováveis de energia, nas últimas décadas. De um ponto de vista idílico, uma fonte de energia sustentável é aquela que não é comprometida de uma maneira significativa pelo uso continuado, não emite gases nocivos ao ambiente em quantidade significativas, não dá lugar a outros problemas ambientais e não colabora na perpetuação de problemas graves de saúde. Tendo em conta estes contextos, as fontes renováveis parecem ser mais sustentáveis que os combustíveis fósseis ou nucleares.

1.1 Energias Renováveis no Mundo

As fontes de energia renováveis são responsáveis pelo abastecimento de cerca de 16% da energia final consumida. Este valor corresponde a contribuições provenientes da energia hidroelétrica, biomassa tradicional e “novas” renováveis – mini-hídrica, biomassa moderna, eólico, solar, geotérmico e biocombustíveis. A parcela com maior impacto pertence à biomassa tradicional (10%) usada principalmente para cozinhar e para conforto térmico; o sector hidroelétrico representa 3,4%, e as restantes renováveis em conjunto, 2,8%, estando a fatia das renováveis a crescer rapidamente tanto nos países mais desenvolvidos e nos em vias de desenvolvimento. De referir que a energia nuclear já vale 2,8%, e que os combustíveis fósseis ainda representam 81% da energia consumida.

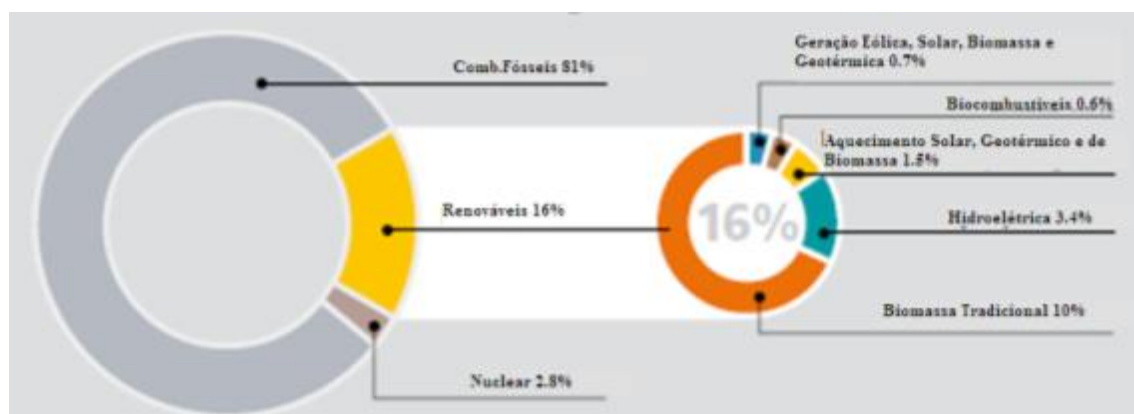


Figura 1 – Quota de energia renovável no consumo de energia final mundial em 2009,[1]

Tabela 1- Aplicações por sector das diferentes energias renováveis

	Electricidade	Aquecimento e arrefecimento	Transporte
Eólico	Em terra (onshore) No mar (offshore)		
Hídrico	Mini-hídrico (< 10MW) Grande hídrico (> 10MW)		
Solar	Fotovoltaico Solar termoelectrico de concentração	Solar térmico	
Oceânico	Ondas Marés		
Geotérmico	Convencional Sistemas geotérmicos avançados	Uso directo Bombas de calor geotérmicas	
Bioenergia	Biomassa Biogás	Biomassa Biogás	Bioetanol Biodiesel Biogás

Uma vez que o sector da energia eléctrica é o que mais interessa no estudo da tecnologia fotovoltaica, a divisão de peso na geração de energia reportada em 2010, é de que os combustíveis fósseis representam 67,6%, a energia nuclear 13%, e as renováveis com 19,4%, sendo repartidas em 16,1% para o sector hidroelétrico e 3,3% para outras renováveis[1]

Entretanto, foram estabelecidas metas de incorporação de renováveis no consumo energético de, pelo menos, 85 países no mundo, incluindo os 27 da União Europeia. A Figura 2 demonstra as metas que a União Europeia estabeleceu para a incorporação de renováveis no consumo energético final em 2020 e a sua repartição pelos 27 estados membros. Sendo de referenciar Portugal que se comprometeu com 31% do seu consumo energético final em 2020 a ser satisfeito por fontes de energia renovável.

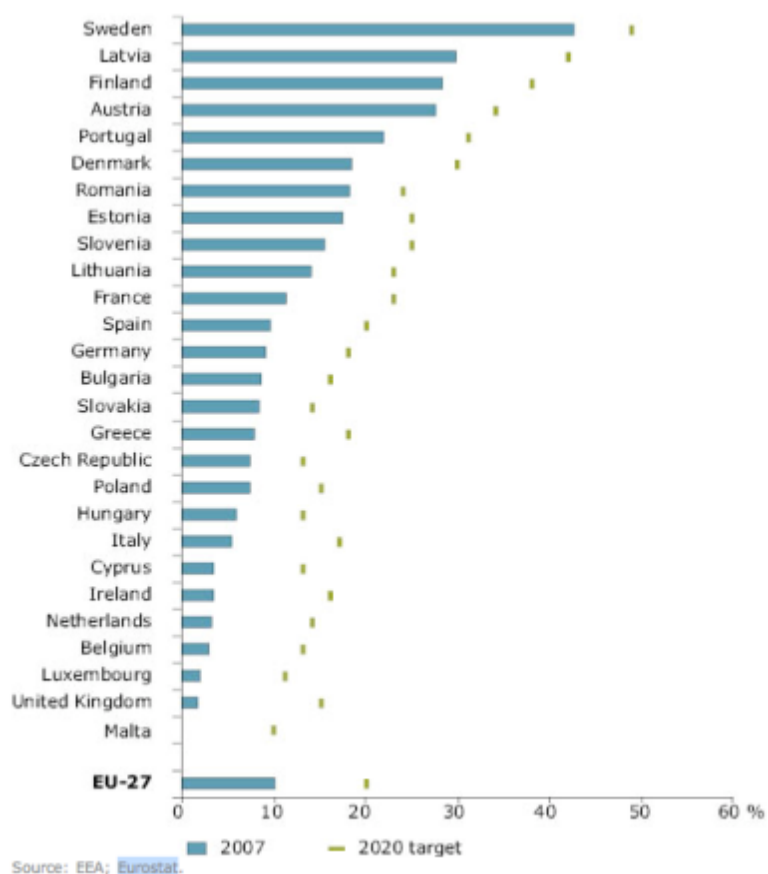


Figura 2 - Metas de incorporação de renováveis no consumo de energia final na EU-27 em 2020[1]

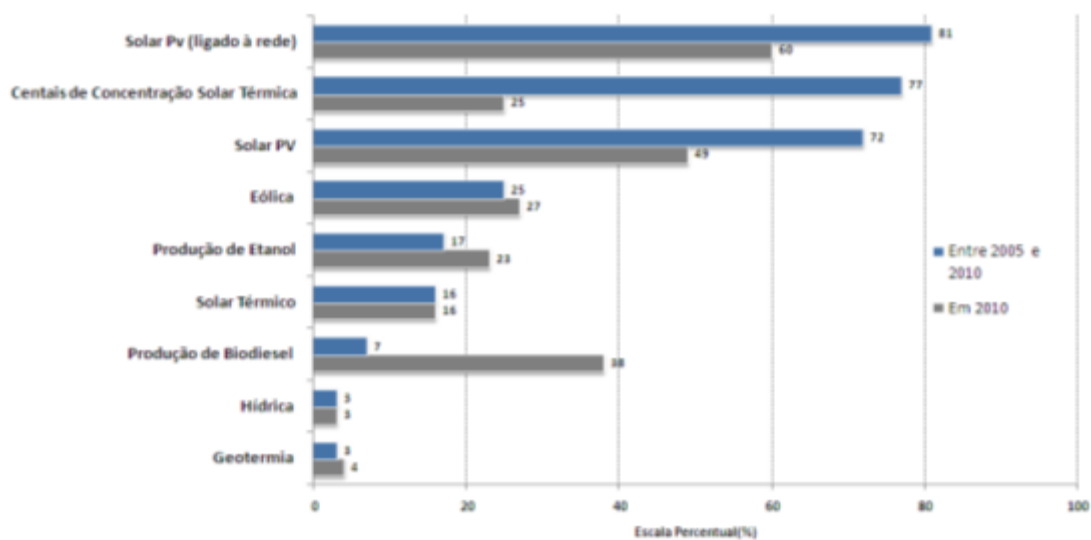


Figura 3 – Taxas de crescimento médias anuais das capacidades das energias renováveis e produção de biocombustíveis a nível mundial[1].

1.1.1 PV no Mundo e em Portugal

Como já referido, a tecnologia fotovoltaica resume-se à conversão directa de energia solar em energia eléctrica. A sua simplicidade de operação dispensando por vezes o recurso a equipamentos com partes móveis e a geradores eléctricos, que se podem tornar problemáticos do ponto de vista da manutenção e fiabilidade, é absolutamente notável. No entanto, na última década os sistemas de *tracking* e de concentração, têm vindo a ganhar força no mercado e para certas e determinadas situações revelam-se muito rentáveis.

Hoje em dia, os sistemas de PV são utilizados numa gama vasta de aplicações de diferentes dimensões, com destaque para as seguintes.

Tabela 2- Aplicações PV para diferentes dimensões de instalação

Grande Potência (unidades ou dezenas de MW)	Média Potência (dezenas ou centenas de KW)	Pequena Potência (décimas ou unidades de KW)
-Produção descentralizada ligada à rede	-Electrificação rural (abastecimento de cargas domésticas em locais remotos sem rede, bombagem de água e irrigação, etc...)	-Relógios e calculadoras
	-Sistemas domésticos ligados à rede, designadamente em telhados de habitações localizadas em áreas desenvolvidas, urbanas ou rurais (micro-geração)	-Sinais rodoviários (móveis e estáticos) e parquímetros -Telefones de emergência, transmissores de TV e de telemóvel
		-Frigoríficos médicos em locais remotos

Em muitas destas aplicações, os sistemas PV substituem, outros meios de produção alternativos, designadamente nas aplicações de pequena potência, onde a sua difusão é muito significativa. Por outro lado, foi por intermédio da indústria espacial, onde a vantagem competitiva dos sistemas PV é relevante, que estes sistemas iniciaram o seu desenvolvimento até ao ponto onde se encontram actualmente.

Para se analisar a situação do PV no Mundo e em Portugal, é preciso ver como se posiciona a tecnologia no contexto das outras principais renováveis.

De acordo com relatórios da REN21, Renewables 2011 Global Status Report, a nível mundial, estão instalados cerca de 1000GW de potência hidroeléctrica, 198GW de eólica e 40GWp de fotovoltaico.

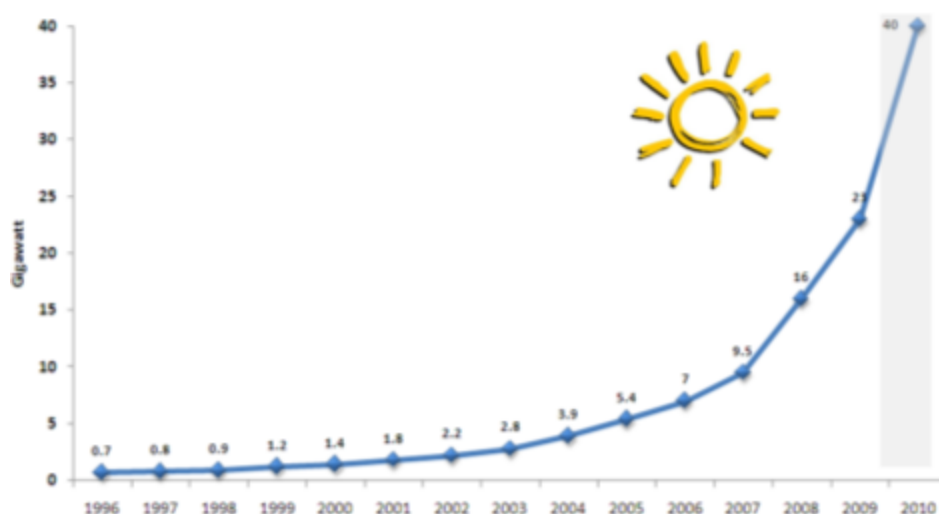


Figura 4 – Capacidade mundial instalada de tecnologia solar fotovoltaica.[1]

Dos 40GW instalados, somente em 2010 foram instalados 17GW, estando a maior contribuição localizada na Europa (Alemanha: 7.4GWp, Itália: 2.3GW). No resto do planeta, merecem destaque o Japão, com um aumento de 1GW, os Estados Unidos da América, com cerca de 0.9GW e a China com 0.6GW instalados em 2010. As estatísticas revelam que Portugal possui uma capacidade de cerca 70MWp.

Em Portugal, tem-se verificado um investimento relevante nas centrais de potência significativa ligadas à rede. Em Março de 2007 foi inaugurada em Brinches, concelho de Serpa, uma central fotovoltaica de 11MW, com 52000 módulos dispostos ao longo de uma área de 60ha (600 000 m²). Um pouco mais recente, a ligação à rede no final de 2008 da central da Amareleja, concelho de Moura, com potência de 46MWp, num total de 260000 módulos de silício multicristalino, ocupa uma área de 250ha,[2]. Neste momento a nível nacional é de salientar a instalação que deu início este ano de um conjunto de lotes de 2MW, perfazendo um total de 150MW a instalar nos próximos 2 anos de energia solar fotovoltaica em Portugal.

Em Portugal o custo do Wp em 2008 situava-se nos 4,2€, para os sistemas de maiores dimensões ligados à rede. Enquanto os sistemas domésticos ligados à rede, de microgeração, são mais caros e ficam na ordem dos 5-6€/Wp[3]. De referir que os valores dados correspondem ao ano de 2008, sendo que actualmente se encontram em forte decréscimo.

1.2 Recurso e Tecnologias Solares

A quantidade de energia que o Sol entrega à Terra extremamente vasta. As reservas mundiais de petróleo estimam-se em $1,7 \times 10^{22}$ J (valor de energia que a Terra recebe do Sol em 1,5dias). O Sol entrega a cada hora que passa, à Terra, a mesma energia que é utilizada nas actividades humanas num ano, cerca de $4,6 \times 10^{20}$ J.[4]

O espectro de radiação electromagnética emitido pelo Sol, que atinge a superfície exterior da nossa atmosfera, vai desde os raios γ e raios X, até às ondas rádio. Apesar de possuir um espectro extremamente largo, a maior parte da sua energia, perto dos 97%, é emitida nos 250 nm e 2500 nm, regiões do ultravioleta, visível e infravermelho próximo.

A irradiância solar total que a superfície da nossa atmosfera recebe, resultante da integração do espectro da Figura 6 numa distância média Sol-Terra, é conhecida como constante solar, uma vez que ao longo dos anos o valor medido se tem mantido constante. O valor da constante solar varia ao longo de um ciclo de erupções solares de 11anos, podendo atingir em ciclos muito activos, constantes solares elevadas de $1367W/m^2$; em ciclos pouco activos a constante solar baixa, mas tal como referido, permanece sempre muito fixa, atingindo o mínimo de $1365W/m^2$. [5]

A radiação incidente na superfície do nosso planeta possui três componentes: a directa, que vem directamente do Sol até à superfície, a difusa, proveniente de todo o céu, excepto do disco solar (radiação difundida em moléculas de gases atmosféricos e gotas de água que pairam na nossa atmosfera e originam o fenómeno de difusão de Rayleigh, que é o responsável pela cor azul do céu) e a componente reflectora proveniente da radiação resultante da reflexão nas superfícies no meio ambiente (chão, edifícios, etc).

Ao percurso óptico que a radiação toma através da atmosfera até ao nível do mar normalizado pelo menor percurso possível (Sol encontra-se numa posição normalizada face à superfície da Terra), dá-se o nome de massa de ar (*Air Mass* – AM).

Na Figura 5 é possível verificar dois tipos de percursos atmosféricos que a radiação solar percorre, sendo a massa de ar definida para diferentes valores de inclinação face à normal da superfície, obtida a partir da secante do zénite, θ .

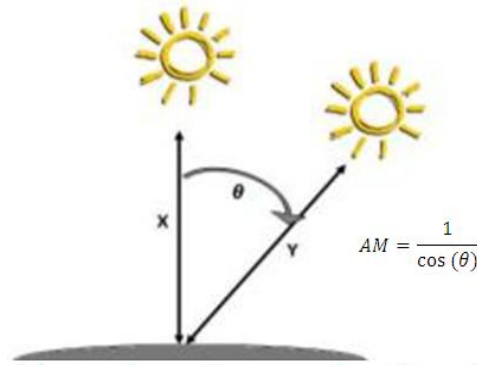


Figura 5 - Massa de ar atravessada pela radiação de ar.

Em situações sem qualquer interferência ou atenuação atmosférica na irradiação solar, dá-se o nome de massa de ar zero, AM0, sendo este o valor de referência para as aplicações extraterrestres. A massa de ar AM1, corresponde ao percurso normal à superfície da Terra e a massa de ar AM1.5 é a considerada como de referência para testes de módulos fotovoltaicos para aplicações terrestres e corresponde à distribuição espectral que chega a uma superfície de inclinação de 37° orientado para sul com um zênite de 48.19°[6]

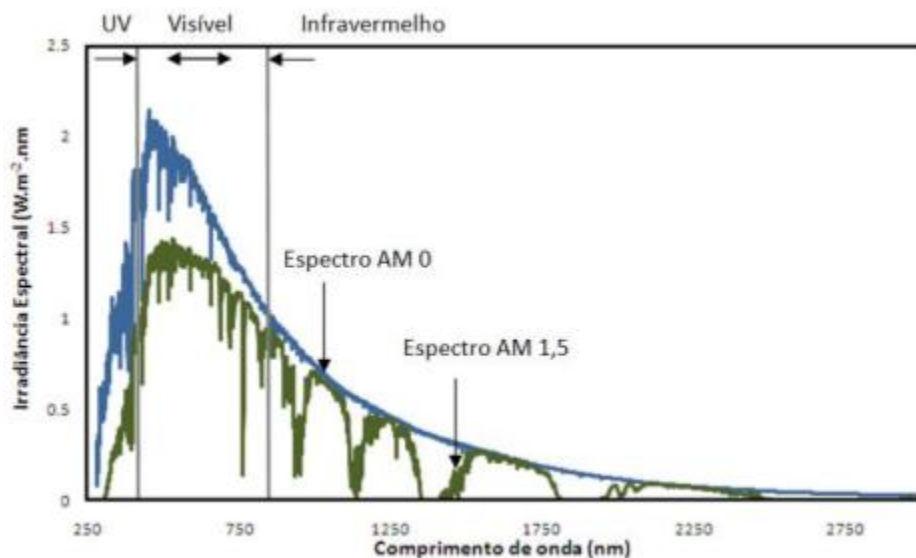


Figura 6 - Espectro Solar com um AM=0 e AM=1.5, em função do comprimento de onda da irradiância

1.3 Tecnologia Fotovoltaica

1.3.1 Materiais Semicondutores

Materiais do estado sólido podem ser agrupados em três classes distintas – isoladores, semicondutores e condutores. A Figura 7 mostra um diagrama com as condutividades eléctricas (e respectivamente as resistividades ($\rho=1/\sigma$)) de um grupo de materiais associado a cada classe. Os isoladores como quartzo fundido e vidro possuem condutividades muito baixas; os condutores por outro lado possuem condutividades bastante elevadas, como o alumínio e a prata. Entre estas classes encontram-se os semicondutores com valores de condutividade intermédios. Uma característica que torna os materiais semicondutores como um dos mais importantes materiais para aplicações electrónicas é o facto de a sua condutividade ser sensível a variações de temperatura, iluminação, campos magnéticos e a impurezas.

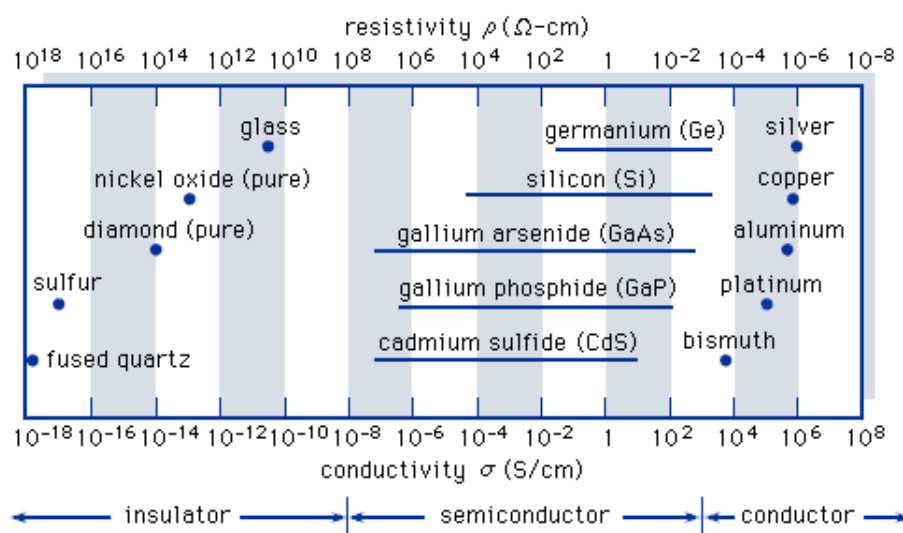


Figura 7 - Condutividades típicas de diferentes materiais associados a cada classe[7]

A análise às propriedades eléctricas de um semicondutor, forma a base para a compreensão e permite uma melhor análise de como utilizar estes materiais em aplicações electrónicas.

A condutividade de um semicondutor face a variações de temperatura é um fenómeno bastante analisado, uma vez que para temperaturas relativamente elevadas, como no caso das temperaturas de operação de uma célula solar, alguns electrões passam para a banda de condução, deixando de estar ligados a um átomo em particular. Esta liberdade irá permitir aos electrões movimentarem-se pela rede cristalina do semicondutor e participarem com facilidade no processo de condução. A níveis de temperatura semelhantes á nossa temperatura ambiente ($T \approx 300\text{K}$), o semicondutor possui electrões livres suficientes para permitir a condução de corrente. Enquanto nestas gamas de temperatura o processo de condução pode ocorrer, a temperaturas baixas e ou próxima do zero absoluto ($T=0\text{K}$), o semicondutor comporta-se como um isolador[7]

Os átomos nos semicondutores mais comuns são elementos que na tabela periódica pertencem ao grupo IV, ou são formados pela combinação de elementos do III com o grupo V, ou formados por elementos do grupo II com o grupo VI (respectivamente denominados de semicondutores III-V e semicondutores II-VI). Combinações com maior número de elementos também é possível e já existem aplicações concretas com as mesmas. Estas combinações permitem criar um gama nova de

semicondutores com características únicas, dado que dependendo do grupo da qual um elemento faça parte, a combinação com outros elementos irá fazer variar essas mesmas características dando origem a um novo elemento semicondutor. A Figura 8 representa os semicondutores mais utilizados (Si e Ge), e os elementos que em combinação são usados para criar novos semicondutores com características próprias.

							VIIIA	
							2	He
							4.003	
		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA		
		5	6	7	8	9	10	
		B	C	N	O	F	Ne	
		10.811	12.011	14.007	15.999	18.998	20.183	
		13	14	15	16	17	18	
		Al	Si	P	S	Cl	Ar	
		26.982	28.086	30.974	32.064	35.453	39.948	
IB	IIB							
29	30	31	32	33	34	35	36	
Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
63.54	65.37	69.72	72.59	74.922	78.96	79.909	83.80	
47	48	49	50	51	52	53	54	
Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
107.870	112.40	114.82	118.69	121.75	127.60	126.904	131.30	
79	80	81	82	83	84	85	86	
Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
196.967	200.59	204.37	207.19	208.980	(210)	(210)	(222)	

Figura 8 – Parcela da tabela periódica onde podemos ver a azul os semicondutores mais conhecidos[8].

No início dos anos 50, o germânio era o principal semicondutor utilizado. No entanto o germânio revelou-se inadequado em muitas das aplicações a que era proposto, em que dispositivos com base de germânio exibiam elevadas correntes de fuga com apenas elevações moderadas na temperatura. Além de que o óxido de germânio é solúvel em água tornando o inadequado para o fabrico de dispositivos.

Nos anos 60 o silício tornou-se no substituto mais pratico para o germânio, e neste momento já suplantou o germânio como matéria-prima no fabrico de dispositivos semicondutores. As principais razões para a utilização do silício em comparação com outros materiais, é que, os dispositivos de silício apresentam correntes de fuga muito mais reduzidas. Existe também a vertente económica, onde o custo por dispositivo de silício tem um custo muito inferior ao de qualquer outro material semicondutor. O silício na forma de sílica (dióxido de silício) e silicatos (composto de silício e oxigénio) compõe cerca de 25% da crosta terrestre, sendo o silício suplantado somente pelo oxigénio no que respeita à abundância.

No presente, o silício é um dos elementos da tabela periódica mais estudados, e a tecnologia de silício é de longe a mais avançada entre as tecnologias de semicondutores[7].

1.3.2 Interação da radiação com os Semicondutores

A absorção de fótons em materiais do estado sólido ocorre através da excitação de electrões para estados energéticos mais elevados. De maneira a todos os fótons de todas as gamas de energia serem absorvidos, isto é, um corpo ter comportamento de corpo negro, os electrões teriam de ter à sua disposição uma gama de estados de energias de excitação continua e ininterrupta. No caso dos metais, tal é o caso. Os metais representam o que de mais próximo se pode encontrar de um corpo negro, caso não reflectissem a maior parte da luz incidente. Uma vez que nos metais a energia de excitação permanece em acção na nuvem electrónica durante um curto período de tempo, a sua utilização directa tem uma baixa eficiência, apesar de que a emissão dos electrões excitados para fora do metal sejam utilizados em foto multiplicadores para a detecção de fótons. A Figura 9 demonstra a absorção de um fóton pelo electrão num metal e a subsequente perda de energia por fonões.

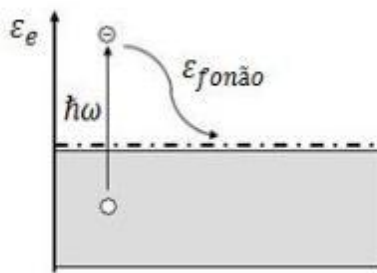


Figura 9 - Excitação de um electrão na banda de condução de um metal pela absorção de um fóton com energia $\hbar\omega$, e a consequente perda da energia de excitação por geração de um fonão.

Nos semicondutores, o mecanismo funciona de outra maneira. Os semicondutores são materiais em que a gama possível de energias de excitação é interrompida por um intervalo de energia E_g (*bandgap* ou hiato). A banda de energia que se encontra abaixo do intervalo de energia, é chamada de banda de valência, que é praticamente ocupada por electrões. A banda de energia que se encontra acima do intervalo de energia, é chamada de banda de condução, que está praticamente vazia, sem electrões. De maneira a libertar um electrão da sua ligação covalente (banda de valência) para a banda de condução, e assim permitir ao electrão participar no fenómeno de condução, é necessário excitar o mesmo da banda de valência onde se encontra naturalmente, para a banda de condução. A incidência de luz (fótons) sobre um semiconductor permite que o fenómeno se dê, para tal é necessário que a energia do fóton absorvido tenha no mínimo a energia do intervalo de energia que separa a banda de valência da banda de condução ($\hbar\omega = E_g$). Os fótons que não respeitem este parâmetro, vão ser reflectidos ou transmitidos pelo semiconductor. (Ignoramos a fraca absorção por fonões, impurezas e cargas livres.) A Figura 10 exemplifica o esquema do processo de excitação de um electrão para a banda de condução através da absorção de um fóton com energia $\hbar\omega$.

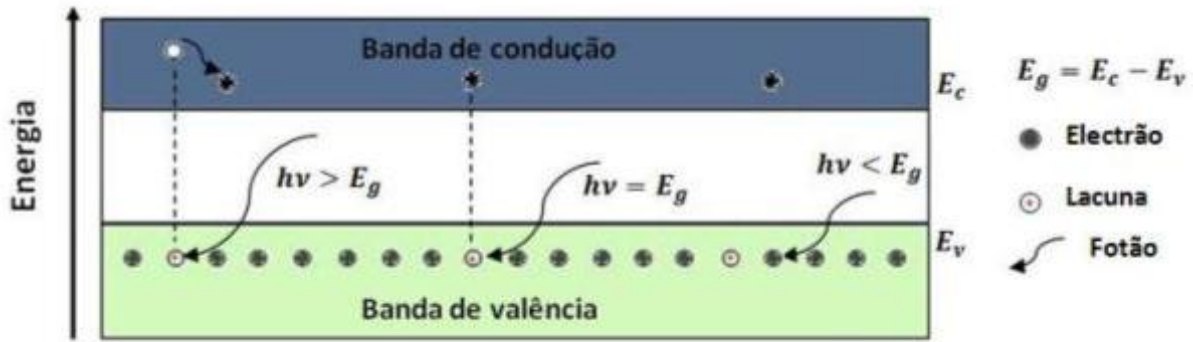


Figura 10 - Excitação de um electrão da banda de valência para a banda de condução de um semicondutor, através da absorção de um fóton. Casos para diferentes energias de fóton.

A energia do fóton incidente é $h\nu$, em que h é a constante de Planck (J.s) e ν é a frequência da radiação, relacionada com o comprimento de onda, λ , através da velocidade de propagação da luz, c , pela expressão;

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{I})$$

Podendo assim definir além de uma energia de fóton mínima abaixo da qual o fóton deixa de ser absorvido pelo semicondutor, a condição inversa pode ser estabelecida para um comprimento de onda máximo, para o qual fótons com comprimentos de onda superiores não serão absorvidos, definindo como comprimento de onda de corte, λ_c .

$$\lambda_c = \frac{h \cdot c}{E_G} = \frac{1.24}{E_G} \quad (\text{II})$$

Assumindo λ_c com as unidades de μm e as de E_G estão em eV.

A excitação do electrão para a banda de condução deixa para trás na banda de valência um espaço vazio (buraco - *hole*) para outro electrão da vizinhança tomar o lugar, e quando esse electrão toma a sua nova posição deixa para trás outro espaço vazio. Este movimento contínuo dos electrões e o espaço vazio que eles deixam para trás, pode ser ilustrado como sendo o movimento de um partícula carregada positivamente na estrutura cristalina do semicondutor. Sendo assim o processo de excitação do electrão para a banda de condução resulta não só em um electrão na banda de condução como também num buraco na banda de valência. Desta forma tanto o electrão como o buraco são portadores de carga.

O hiato de energia (*bandgap*) é geralmente denominado de energia mínima necessária para a excitação de um electrão para participar no processo de condução. O conhecimento e análise deste hiato de energia é muito útil e prático nas aplicações de PV, uma vez que permite compreender a quantidade de energia necessária que precisamos de recolher do Sol para que ocorra condução, e para o objectivo final que é a geração de electricidade.

O valor do intervalo de energia, E_G , é um valor característico para semicondutor. Na Tabela 3 encontramos alguns valores de referência dos materiais mais utilizados em células fotovoltaicas.

Tabela 3 – Hiatos de energia de alguns materiais semicondutores[9]

Material Semicondutor	E_g (eV)
Ge	0.7
Si	1.12
GaAs	1.43
a-Si:H	>1.5
CdS	2.53

Uma vez que o silício se tem mostrado como o semicondutor com maior utilização no mundo do PV, o aproveitamento dos fótons incidentes sobre uma amostra de silício só ocorre para os comprimentos de onda inferiores a $\lambda_c = 1.1\mu\text{m}$ (região do infravermelho), levando a que uma larga região do infravermelho (entre $1.1\mu\text{m}$ e $3\mu\text{m}$) não seja utilizada no processo fotovoltaico. A região aproveitada está exposta na Figura 11 como área B, e a região desaproveitada está identificada como área A.

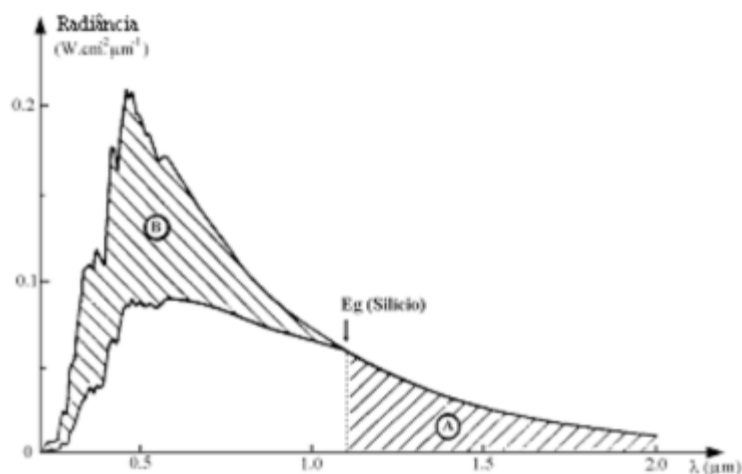


Figura 11 – Espectro solar e o aproveitamento da radiação pelo silício[9].

No entanto, a criação dos pares electrão-buraco no interior do semicondutor, não se revela suficiente para a geração de uma corrente eléctrica, é ainda necessário criar no interior do material uma estrutura que permita separar os portadores de carga gerados no semicondutor e que promova a sua extracção. Na tecnologia fotovoltaica, o processo mais utilizado para esta separação, é a criação de uma barreira de potencial que se estabelece na interface de dois semicondutores de tipos diferentes, isto é, com dopagens diferentes, a que se chama junção *p-n*.

O silício é um elemento do grupo IV da Tabela Periódica, com quatro electrões nas orbitais de valência. A adição, durante a formação do cristal de silício, de átomos de elementos do grupo V, com cinco electrões nas orbitais de valência, como por exemplo o fósforo, conduz a que, quatro electrões partilhem as orbitais de valência com os quatro átomos de silício envolventes, permitindo a passagem de um electrão desemparelhado para a banda de condução. Os semicondutores dopados deste modo dizem-se do tipo *n*, por possuírem portadores de carga predominantemente negativos, electrões.

A adição de átomos do grupo III, com três electrões de valência, como por exemplo o boro, conduz a que uma orbital de valência num dos átomos de silício envolventes fique incompleta, dando origem a uma lacuna na banda de valência. Os semicondutores assim dopados, denominam-se de tipo *p* por possuírem portadores de carga predominantemente positivos, lacunas.

Quando se cria uma junção $p-n$ na interface entre dois semicondutores dos tipos p e n , electrões livres do material do tipo n fluem por difusão para o material do tipo p e inversamente as lacunas do material do tipo p fluem para o material do tipo n , dando origem á formação de um forte campo eléctrico na junção, que impede a continuação do fluxo indefinidamente e constitui uma barreira de potencial. Se todos os electrões, da banda de condução tiveram origem nos buracos, da banda de valência, diz-se que o material é intrínseco, logo, $n = p$.

Os materiais de tipo- p são os mais utilizados na electrónica de portadores minoritários porque os electrões têm uma mobilidade superior às dos buracos[10].

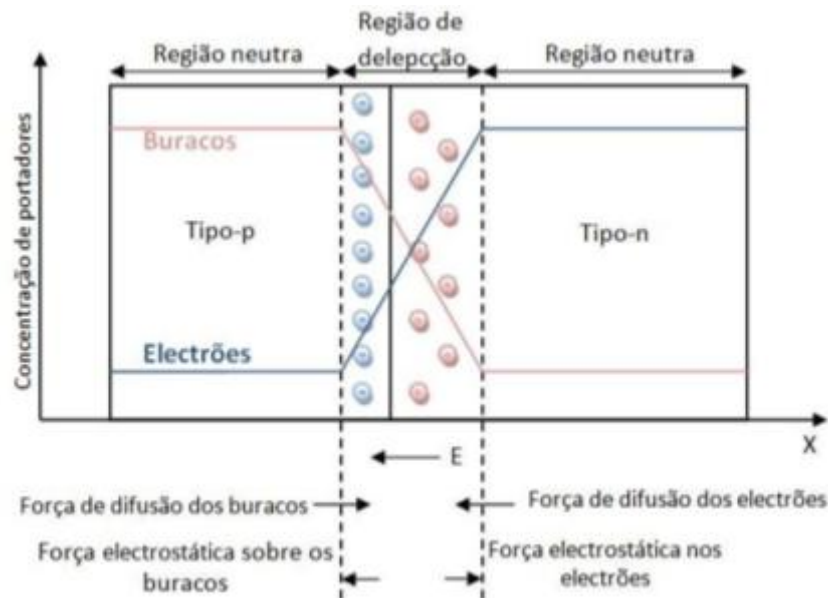


Figura 12 - Esquema em equilíbrio termodinâmico da junção $p-n$. Fora da região de depleção o campo eléctrico não tem efeito.

A Figura 12 mostra esquematicamente o funcionamento da junção $p-n$, tanto a nível da barreira potencial, como no campo eléctrico, polaridade e concentração dos portadores de carga.

Como resultado desta barreira de potencial, os portadores de carga de cada um dos lados da junção, não são capazes de atravessar a junção, e são repelidos pela região de carga com o mesmo sinal dos portadores. Á região próxima da junção dá-se o nome de zona de depleção, e como consequência, verifica-se um encurvamento das bandas de energia que ligam os dois tipos de material.

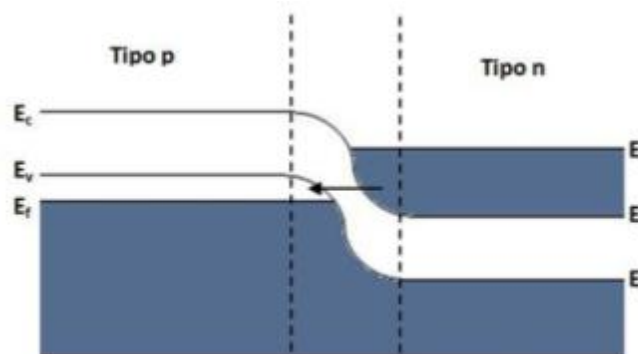


Figura 13 - Bandas de energia na junção $p-n$, zona de depleção delimitada pela zona a tracejada e a direcção do campo eléctrico na junção.

Esta junção funciona como um rectificador ou díodo, pois a aplicação de uma diferença de potencial, com a voltagem positiva no material do tipo *p*, diminui a barreira de potencial e permite que a corrente atravesse a interface, enquanto a aplicação de uma diferença de potencial inversa aumentará a barreira de potencial não permitindo a passagem de corrente.

A expressão que rege a variação da intensidade de corrente *I*, com a diferença de potencial aos terminais de um díodo ideal, *V*, é dada pela equação de Shockley,

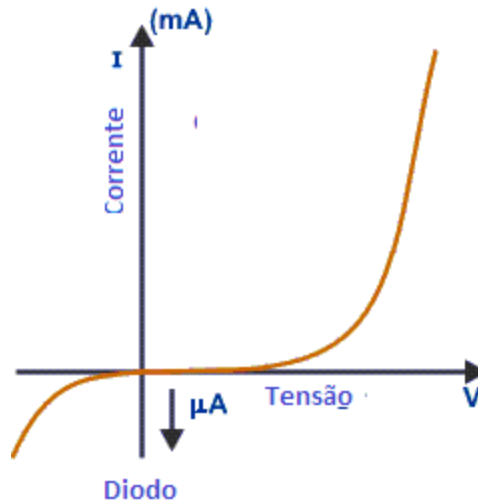


Figura 14 - Gráfico IV de um díodo ideal. Equação de Shockley.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \quad (\text{III})$$

Sendo I_0 a corrente de saturação que atravessa o díodo, q é o valor absoluto da carga do electrão, k a constante de Boltzmann e T a temperatura absoluta da junção. Na Figura 14, encontra-se representada esquematicamente a equação de Shockley, através da curva $I(V)$ de um díodo ideal[6].

1.3.1 Absorção de Radiação

Tal como referido no capítulo de Interação da radiação com os Semicondutores, um semicondutor quando iluminado por uma fonte externa, os fótons incidentes iram ser absorvidos, reflectidos ou até mesmo transmitidos através do material semicondutor. No estudo da tecnologia fotovoltaica o único processo que acaba por interessar é o de absorção, dado que só assim pode ser gerada energia.

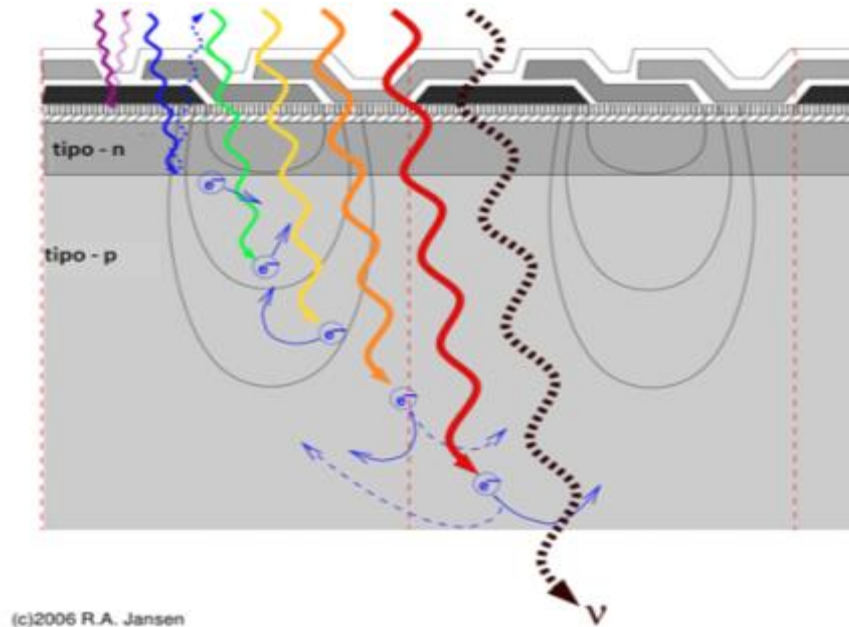


Figura 15 - Absorção, reflexão e transmissão de fótons com diferentes comprimentos de onda numa célula fotovoltaica.[11]

A distância que um fóton com um dado comprimento de onda consegue percorrer num determinado material (profundidade de absorção), é definida pelo coeficiente de absorção. O coeficiente de absorção depende do material e do comprimento de onda dos fótons absorvidos. Tal como referido anteriormente, materiais semicondutores têm um perfil de absorção muito característico, no qual existe um corte repentino nos fótons incidentes com energia inferior ao hiato do semicondutor, não sendo assim absorvidos pelo material.

Como se verifica na Figura 16 para diferentes materiais semicondutores, o coeficiente de absorção comporta-se de maneira diferente:

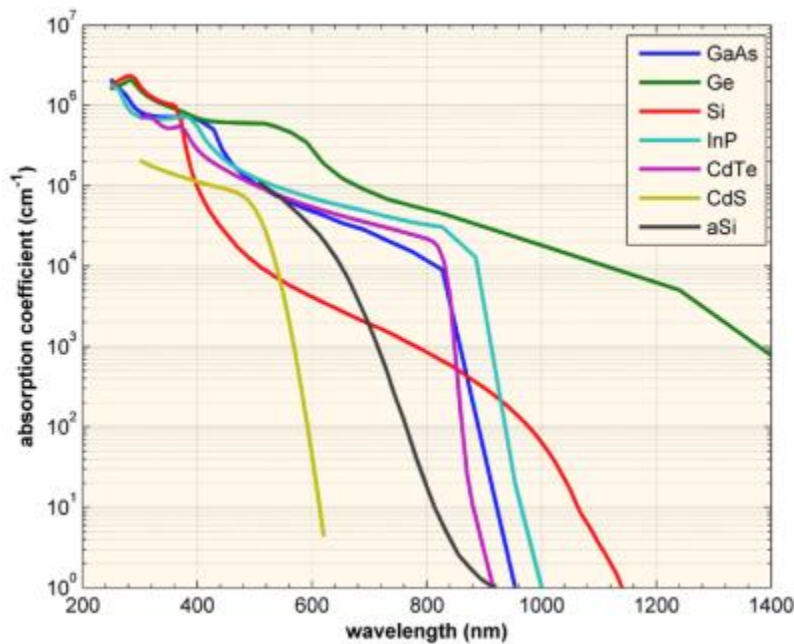


Figura 16 - Coeficiente de Absorção de vários materiais semicondutores, medidos a 300K e em função do comprimento de onda em vácuo da luz.[8]

Da relação entre o coeficiente de absorção e o comprimento de onda, definiu-se que para diferentes comprimentos de onda diferentes profundidades de absorção, que se define pelo inverso do coeficiente de absorção, α^{-1} . No entanto para fótons com energias muito elevadas (baixo comprimento de onda) o comprimento de difusão torna-se baixo, sendo mais rapidamente absorvido, o inverso se passa com fótons com baixa energia, não são facilmente absorvido e por isso penetram mais facilmente na matriz cristalina do semiconductor. A profundidade de absorção de radiação num dado material afecta o funcionamento de uma célula solar, obrigando a escolhas tais como a espessura do semiconductor a utilizar na célula.

Actualmente e como já referido, o material mais utilizado na tecnologia PV é o silício, e por isso, o coeficiente de absorção relevante ao trabalho é o do silício. O Anexo I mostra a curva do coeficiente de absorção específico do silício, e como se verifica no mesmo, é demonstrado que para os fótons com energia acima do hiato, o coeficiente de absorção não é constante, e continua dependente do comprimento de onda (energia). [12]

1.3.2 Geração e perfil de distribuição de Portadores

Tal como debatido anteriormente, a absorção de fótons por parte de um semiconductor vai gerar portadores de carga minoritários na banda de condução.

Nos estudos feitos por Peter Wurfel, no qual esta dissertação se baseia [13][14], utiliza-se uma equação importante para as seguintes considerações, a equação de continuidade.

A utilização da equação continuidade, na sua forma fundamental para uma variável quantificável como por exemplo, a concentração de um certo tipo de partícula i (ex: electrões), resulta em;

$$\frac{\delta n_i}{\delta t} x = G_i x - R_i x - \text{div}.j_i x \quad (\text{IV})$$

Esta relação exprime que a densidade n_i de partículas do tipo i num dado elemento de volume de localização x , aumenta com o tempo quando estas partículas são geradas espontaneamente a um ritmo de G_i , mas diminui com o tempo quando estas partículas são eliminadas a um ritmo de R_i , ou quando as partículas escapam da posição x , devido á densidade de corrente da partícula j_i . A densidade de partículas diminui com a densidade de corrente uma vez que $\text{div}.j_i > 0$.

As condições de fronteira imposta nestes sistemas, são especiais, dado que seria necessário caracterizar as duas superfícies de uma amostra com uma certa espessura (d) de acordo com a velocidade de recombinação das partículas, mas dado que existe uma injeção de portadores em excesso na superfície frontal da amostra ($x=0$), a mesma superfície terá de ser desprezada (será explicado com maior profundidade no desenrolar do documento). Sendo portanto a difusão dos portadores em excesso injectados dada por:

$$j_e d = -D_e \frac{\delta n_e}{\delta x} d = S.n_e(d) \quad (\text{V})$$

$$\text{div}.j_e x = -D_e \frac{\delta^2 n_e}{\delta x^2} d \quad (\text{VI})$$

Sendo caracterizado pela velocidade de recombinação na superfície traseira ($x=d$) S , com D_e a ser o coeficiente de difusão do electrão. De salientar que $j_e(x)$ é um fluxo de corrente da partícula e não uma corrente eléctrica.

Assumindo uma fonte externa de fótons incidente na superfície do semiconductor, que a geração espontânea é nula, e que nos encontramos no estado estacionário, onde não há alterações no tempo. Com estas condições é então possível resolver a equação continuidade para os electrões no estado estacionário,

$$\frac{\delta^2 n_e}{\delta x^2} - \frac{n_e}{L_e^2} = 0 \quad (\text{VII})$$

da qual resulta,

$$n_e x = A.e^{\frac{x}{L_e}} + B.e^{-\frac{x}{L_e}} \quad (\text{VIII})$$

Com,

$$A = n_e \left(0 \frac{1+r}{1-r + \frac{1+r}{e^{\frac{2d}{L_e}}}} \right) \quad (IX)$$

$$B = n_e \left(0 \frac{1+r}{1+r + \frac{1-r}{e^{\frac{2d}{L_e}}}} \right) \quad (X)$$

Sendo $L_e = \overline{D_e \cdot \tau_e}$, o comprimento de difusão do electrão, τ_e o tempo de vida e $r = \frac{S \cdot L_e}{D_e}$. Permitindo que se recrie um perfil de densidades de cargas em função dos portadores injectados, do comprimento de difusão e da velocidade de recombinação de superfície.

Obtendo-se a seguinte equação e o perfil,

$$n_e(x) = n_e \left(0 \frac{1+r}{1-r + \frac{1+r}{e^{\frac{x}{L_e}}}} + \frac{1+r}{1+r + \frac{1-r}{e^{\frac{x}{L_e}}}} \right) \quad (XI)$$

No Anexo II, é possível verificar o desenvolvimento destas expressões mais ao pormenor, permitindo um melhor entendimento da física por trás deste sistema.

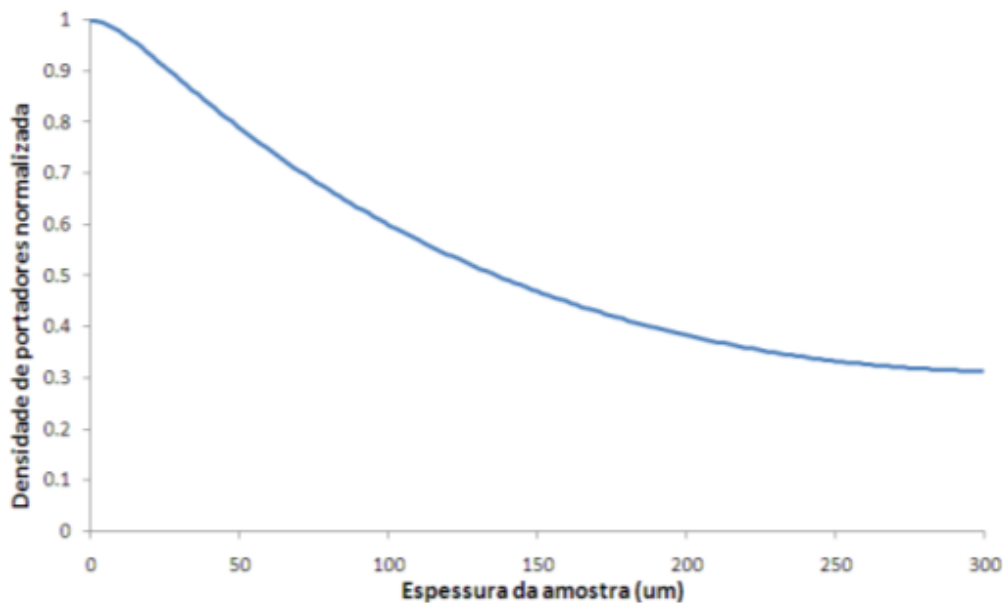


Figura 17 -Perfil de distribuição dos portadores minoritários ao longo da espessura da amostra. Perfil elaborado para uma injeção de 1×10^{16} portadores, velocidade de recombinação superficial de 100 cm/s , coeficiente de difusão de $30 \text{ cm}^2/\text{s}$ e uma amostra de espessura $300 \text{ }\mu\text{m}$.

Numa condição de injeção de portadores de carga junto a uma superfície, o resultado de perfil desta distribuição fora do equilíbrio da amostra revela-se numa densidade de portadores máxima na região de excitação com uma progressão exponencial negativa, tendo em conta a difusão dos portadores pelo volume da amostra.

1.3.3 Movimentação das Cargas Portadoras

Os electrões na banda de condução e as lacunas na banda de valência, são considerados portadores “livres” no sentido de que se movem livremente pela matriz do cristal semiconductor. O movimento dos portadores é errático, mas com velocidade definida.

Os portadores movem-se em direcções aleatórias uma certa distância até colidirem com um outro átomo pertencente á rede cristalina do semiconductor. Uma vez que essa colisão ocorra, o portador toma uma outra direcção até que colida com outro átomo.

A velocidade dos portadores é determinada pela sua temperatura e massa, e em nenhuma situação existe uma movimentação agrupada de portadores. Cada portador possui a sua imprevisibilidade de movimentação e apesar da interacção entre portadores, o mesmo não implica que se movimentem em conjunto, a não ser em situações de existência de um gradiente explícito de concentração de portadores ou a existência de um campo eléctrico externo.

Em casos onde existe um gradiente de concentração de portadores no semiconductor, ocorre sim um movimento agrupado dos portadores. Sendo este movimento direccionado da zona de maior concentração para as zonas onde existe uma menor concentração de portadores. Este mecanismo tem o nome de Difusão. Quando a radiação solar (ou excitação externa artificial) incide sobre a superfície da célula solar, os portadores são automaticamente gerados mais à superfície do que no interior do semiconductor, o que cria um gradiente na concentração dos portadores promovendo o mecanismo de difusão da superfície para o resto da célula. Á medida que a difusão ocorre devido ao gradiente criado, e que o tempo vai passando, a concentração de portadores começa a uniformizar-se pela amostra até se atingir o equilíbrio.

1.3.4 Efeito de Recombinação

Na geração de portadores em excesso num material semiconductor, através de iluminação ou uma injeção directa de portadores, por aplicação de uma tensão ou corrente, o material deixa de se encontrar em equilíbrio termodinâmico e os electrões existentes na banda de condução encontram-se no chamado Estado Meta-Estável, e eventualmente transitarão para um nível de energia na banda de valência. No momento em que tal ocorre, o electrão necessita de se deslocar para um estado da banda de valência vazio, removendo no processo um buraco na banda de valência. A este efeito, chamamos de recombinação. Sendo caracterizado por três tipos básicos, cuja relevância varia mediante as condições de dopagem e a excitação de portadores.

Embora a recombinação seja um processo natural em semicondutores, ele é responsável pela maior parte de perdas da energia dos fotões absorvidos. Juntamente com as perdas resistivas (em volume, no emissor e nos contactos metálicos) e as perdas ópticas (transmissão IV e termalização) representam os processos de perda mais importantes na tecnologia de células de silício.

O impacto do efeito recombinativo no efeito fotoeléctrico e subsequentemente na eficiência de uma célula solar, traduz-se no tempo que os portadores minoritários permanecem na banda de condução do material semiconductor antes de voltarem à banda de valência.

O que caracteriza a eficiência de uma célula solar, é o rácio de energia radiativa incidente ($E_{rad.inc}$) com a energia eléctrica ($E_{eletrica}$) extraída da célula por efeito fotoeletrico.

$$\eta_{PV} = \frac{E_{eletrica}}{E_{rad.inc}} \quad (XII)$$

O efeito recombinativo tem impacto sobre o factor $E_{eletrica}$, e nada se pode fazer quando á radiação incidente.

Como explicado anteriormente, a iluminação de um semiconductor excita um electrão da banda de valência para a banda de condução, e é esse processo que permite que ocorra o fenómeno de condução para assim se gerar uma corrente. Para que esta corrente seja gerada, é necessário que o electrão que se

encontra na banda de condução permaneça lá o tempo suficiente (tempo de vida) para que este se difunda para perto da zona de depleção (campo eléctrico) e assim entrar no circuito de geração de corrente, gerando então a desejada energia eléctrica. Resumindo, caso os electrões passem pouco tempo na banda de condução, eles irão recombinar-se e assim não terão a possibilidade de fazer parte da geração de energia eléctrica. Desta maneira é possível relacionar o efeito recombinativo com a eficiência de uma célula.

Numa amostra podem ocorrer 2 tipos de recombinação, a recombinação de volume (*bulk*) e a recombinação de superfície, que é debatida em pormenor mais tarde neste documento.

De seguida são discutidos os três mecanismos de recombinação fundamentais

- Recombinação Radiativa;
- Recombinação de Auger;
- Recombinação Shockley-Read-Hall, SRH.

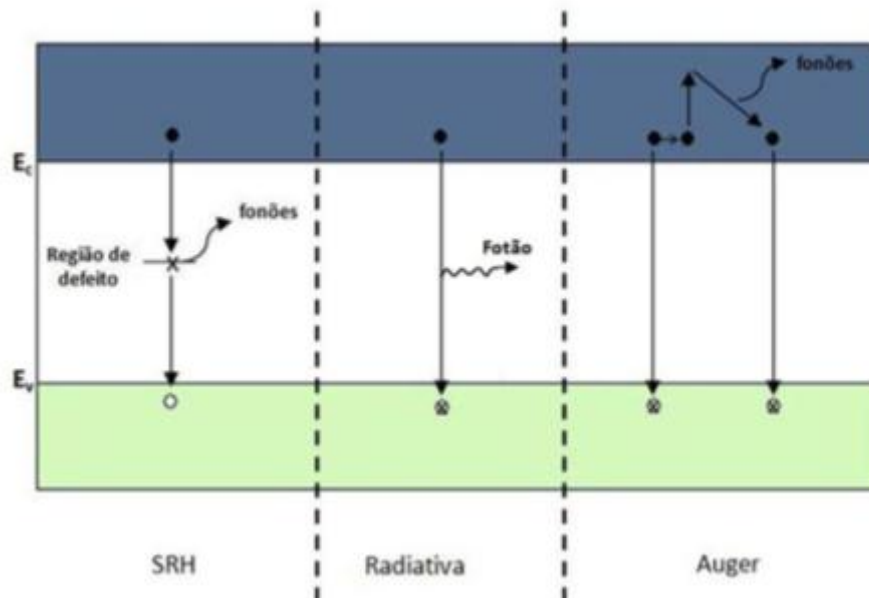


Figura 18 - Os três mecanismos de recombinação no *bulk* de um semicondutor.

1.3.4.1 Recombinação Radiativa

A recombinação radiativa é o fenómeno de recombinação mais comum em semicondutores de passagem de nível directa (banda-a-banda). O exemplo mais conhecido deste tipo de recombinação em dispositivos semicondutores, é a luz emitida pelos LEDs. O fenómeno de recombinação radiativa é apenas o inverso da absorção de radiação retratada anteriormente nesta dissertação.

Um electrão que ocupe um estado energético mais elevado do que ocuparia em condições de equilíbrio térmico, transita para um estado energético mais baixo que se encontre vazio, sendo todo o diferencial energético entre os estados inicial e final emitido em forma de luz. A recombinação radiativa ocorre mais rapidamente em transições directas nos semicondutores do que em transições indirectas.

A taxa de recombinação radiativa, R_R , é proporcional ao produto entre a concentração de portadores na banda de condução (electrões) e a concentração de portadores na banda de valência (lacunas)

$$R_R = B(n \times p) \quad (\text{XIII})$$

sendo B o coeficiente de recombinação radiativa, n e p , respectivamente a densidade de portadores minoritários (electrões) e maioritários (buracos), admitindo um material de tipo p . Tendo em conta a relação existente entre o processo de absorção óptica e este tipo de recombinação, B pode ser calculado através do coeficiente de absorção do material semiconductor[13].

Em equilíbrio, quando $n \cdot p = n_i^2$, a taxa de recombinação é equilibrada pela geração espontânea de portadores. Ou seja, na ausência de geração por meio de um estímulo externo a taxa de recombinação final, U_R , é dada pela recombinação menos a taxa de geração no equilíbrio[15]

$$U_R = B(np - n_i^2) \quad (XIV)$$

Numa situação de uma amostra de silício do tipo- p , vem que:

$$U_R = B \cdot n(p_0 + n_0 + n) \quad (XV)$$

Onde p_0 e n_0 são, respectivamente as densidades de buracos e electrões em equilíbrio definidas pela dopagem.

1.3.4.2 Recombinação de Auger

A recombinação de Auger pode ser considerada o inverso da ionização por impacto, onde um electrão com energia cinética suficiente “abalroa” outro electrão para fora da sua ligação, criando assim um electrão livre. No inverso, na recombinação de Auger, a energia libertada durante a recombinação em vez de se perder em forma de calor ou em forma de um fóton, é transferida como energia cinética para um outro electrão na banda de condução. Este electrão perde então a energia extra e retorna ao limite da banda de condução.

Em situações de dopagens muito fortes ou de injeções elevadas com concentração de luz solar, a Recombinação de Auger é de extrema importância. Dado a existência de um terceiro portador participante neste fenómeno, assume-se que quanto maior for a densidade de portadores minoritários, maior será o impacto deste efeito recombinativo e subsequentemente menor será o tempo de vida. A Recombinação de Auger representa uma perda praticamente inevitável e determina os limites de eficiência das melhores células solares de silício.

A taxa de recombinação de Auger para amostras do tipo- p , é dada pela seguinte equação[15].

$$R_{Auger} = C_p \cdot n(p_0 + n)^2 + C_n \cdot n(n_0 + n)^2 \quad (XVI)$$

Com C_p e C_n são os coeficientes de recombinação de Auger.

1.3.4.3 Recombinação de Shockley-Read-Hall, SRH

A recombinação via impurezas (defeitos), também conhecida como Shockley-Read-Hall ou SRH, não ocorre em semicondutores puros ou sem defeitos. SRH é um processo a dois passos. Os passos que envolvem a Recombinação são:

1. Durante a recombinação, um electrão (ou lacuna) fica aprisionado num estado energético na região proibida (*band-gap*) que é introduzido por meio de defeitos na matriz do cristal. Estes defeitos podem ser gerados sem qualquer intenção, ou então propositadamente, como por exemplo na dopagem.
2. Se um buraco (ou electrão) se movimentar até ao mesmo estado de energia antes que o electrão (ou buraco) seja reemitido para a banda de condução, ocorre a recombinação.

Estes estados de recombinação podem actuar inclusive como armadilhas, fazendo com que um portador capturado num desses estados seja injectado de novo na banda de energia de onde ele veio. Este regresso á banda de origem apesar de não contribuir directamente para o fenómeno de recombinação através de variações na densidade de portadores, tem sempre um impacto forte na dinâmica geral dos portadores[16]

1.3.4.4 Tempo de Vida e Comprimento de Difusão

De todos os parâmetros utilizados para a caracterização de semicondutores e em especial na tecnologia de células solares fotovoltaicas, o tempo de vida e o comprimento de difusão dos portadores minoritários são sem dúvida os de maior relevância. Se o número de portadores minoritários atingir um valor superior ao de equilíbrio por meios de uma excitação externa (radiação solar incidente), os portadores minoritários em excesso decaem até á concentração de equilíbrio através do processo de recombinação. Para se medir o ritmo a que a recombinação ocorre, pode-se medir de que forma varia a condutividade do semiconductor em função do tempo após a paragem da excitação. Tal como o nome indica, o tempo de vida corresponde ao tempo que decorre entre a excitação dos portadores do semiconductor para um nível de energia mais elevado até que o sistema regresse ao seu estado de equilíbrio através do fenómeno de recombinação (até a concentração em excesso retomar a 1/e da sua concentração inicial)[16]. Dizer que “a amostra de silício tem um tempo de vida alto” geralmente significa que os portadores minoritários gerados pela radiação solar no interior da amostra vão levar mais tempo até se recombinarem. E como já referido no capítulo anterior, é natural que uma célula solar feita a partir de bolachas de silício com portadores minoritários com elevado tempo de vida, seja mais eficiente que outras células com tempos de vida mais curtos.

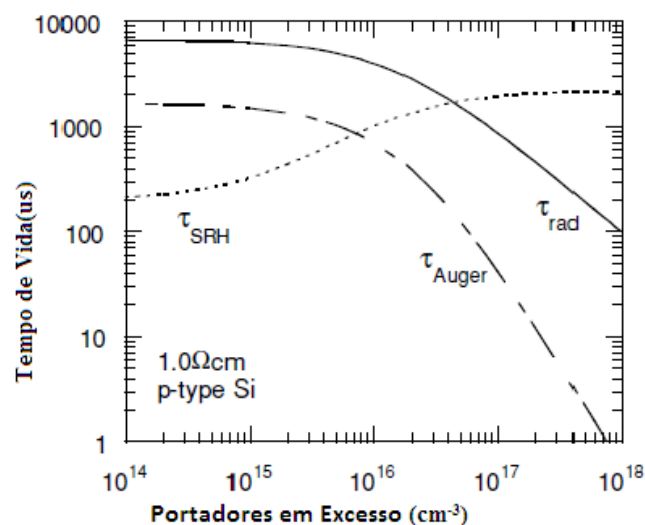


Figura 19 - Tempos de vida dos três mecanismos de recombinação em função dos portadores em excesso numa amostra de silício tipo-p.[16]

Como se verifica na Figura 19, o mecanismo de SRH, que depende fortemente da densidade de defeitos do material, tende a dominar para concentrações de portadores baixas, enquanto a radiativa e a de Auger competem entre elas para densidades de portadores altas. Para amostras com dopagens reduzidas, a recombinação radiativa sobrepõe-se á de Auger em processos de baixa injeção, mas nestes casos a de SHR é a dominadora. Nos materiais fortemente dopados, a recombinação de SRH é a mais forte de todos os mecanismos, dado a sua dependência aos estados intermédios, já o mecanismo de Auger tem uma influência mais significativa que a radiativa para quaisquer níveis de injeção na amostra.

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{Rad}} + \frac{1}{\tau_{Auger}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} \quad (XVII)$$

O tempo de vida pode ser representado de uma maneira geral, como sendo quociente entre a concentração de portadores minoritários e a taxa de recombinação, representa-se como na equação seguinte[17]

$$\tau = \frac{\Delta n}{U} \quad (XVIII)$$

O outro parâmetro que se encontra integralmente ligado á taxa de recombinação, é o comprimento de difusão dos portadores minoritários, que é a distância média que um portador consegue percorrer durante o seu tempo de vida, ou seja, a distância percorrida desde o momento da sua geração até ao momento em que se recombina. O comprimento de difusão como o tempo de vida dos portadores depende do tipo e da magnitude dos mecanismos de recombinação no semiconductor. Tal como referido, para certos tipos de células de silício, a recombinação SRH é o mecanismo dominante. A taxa de recombinação vai também depender do número de defeitos presentes no material, por isso a dopagem do semiconductor irá promover um maior número de defeitos, e sucessivamente uma maior taxa de recombinação de SRH. A recombinação de Auger ocorre mais facilmente em materiais fortemente dopados e altamente excitados[18]

O comprimento de difusão encontra-se directamente relacionado com o tempo de vida, de acordo com a seguinte equação[14]

$$L = \sqrt{D\tau} \quad (XIX)$$

Com L a ser o comprimento de difusão dado em metros (m), e D o coeficiente de difusão dado em m^2/s e onde τ representa o tempo de vida em segundos (s).

1.3.4.5 Recombinação Superficial

Qualquer defeito ou impureza na superfície de um semiconductor promove automaticamente o fenómeno de recombinação. Dado que a superfície de uma célula solar é uma interrupção na matriz cristalina do semiconductor, isto vai tornar as superfícies das células solares em locais de elevada taxa de recombinação. No processo de difusão, uma região com uma concentração reduzida de portadores, tende a atrair portadores das regiões vizinhas que possuam concentrações mais elevadas. Isto implica que a taxa de recombinação superficial seja limitada pela taxa de portadores que se difunde para a superfície. Para caracterizar este parâmetro, utiliza-se a chamada, velocidade de recombinação, em unidades cm/s. Numa superfície sem recombinação, o movimento de portadores para a superfície é nulo, logo a velocidade de recombinação é zero. Mas, num caso de uma velocidade de recombinação extremamente elevada, o movimento dos portadores para a superfície só é limitado pela sua velocidade limite, sendo geralmente na ordem dos 10^7 cm/s para a maioria dos semicondutores[8]

As células solares tendem geralmente a possuir espessuras muito pequenas, fazendo com que os tempos de vida medidos na caracterização das células estejam alterados pelas velocidades de

recombinação superficiais, mascarando assim o tempo de recombinação da região interna (*bulk*) que é o indicador de qualidade intrínseca do material. Na medição de tempos de vida dos portadores minoritários, é de maior interesse que se obtenham valores o mais próximos possíveis dos característicos do interior do semiconductor (*bulk*), mas para isso é necessário reduzir ao máximo a influência dos estados energéticos da superfície, tornando negligenciável a velocidade de recombinação á superfície na análise. A este processo de redução da velocidade de recombinação á superfície, chamamos de passivação de superfície.

A técnica de passivação consiste na redução da densidade de estados da superfície do semiconductor, reduzindo a concentração de um dos tipos de portadores presentes, electrões ou lacunas, através da criação de uma zona de depleção superficial utilizando um campo eléctrico de forma a repelir os portadores que se tenham difundido para junto da superfície[8]

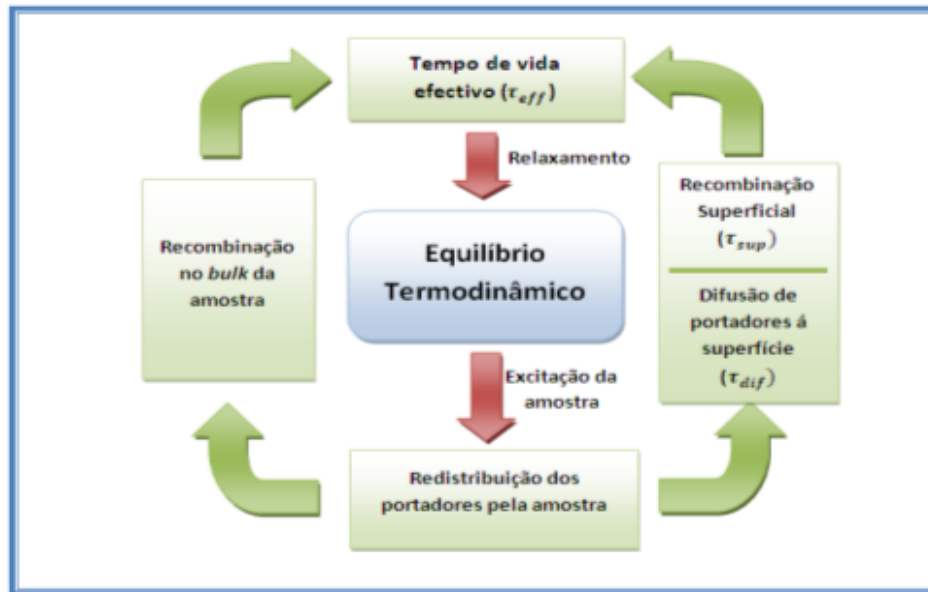


Figura 20 - Fenómenos físicos que ocorrem desde a excitação de uma amostra até ao retorno ao ponto de equilíbrio[15]

Tal como mostra a Figura 20, o tempo efectivo medido nas técnicas de caracterização é dado pela combinação entre o tempo de vida no *bulk* da amostra e a recombinação á superfície que pode igualmente ser traduzida por um tempo de vida[15]

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{1}{\tau_{sup}} \quad (XX)$$

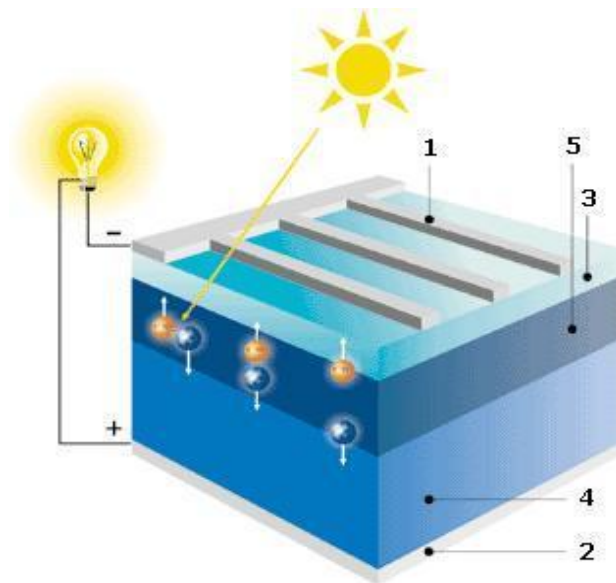
1.3.5 Funcionamento de uma célula solar

Como já foi referido anteriormente, uma célula solar, é um dispositivo que converte directamente a energia proveniente do sol em energia eléctrica. A luz incide sobre a célula solar que produz tanto uma corrente como uma tensão de maneira a gerar uma potência eléctrica. Para se dar o fenómeno fotoeléctrico, é necessário um material (semicondutor, junção $p-n$) que ao absorver a luz (fótons), eleve um electrão para um estado energético mais elevado, e posteriormente transportar este electrão altamente energético, da célula solar para um circuito externo. O electrão ao chegar ao circuito externo, dissipa a energia extra que possui e regressa á célula solar, para refazer este mesmo ciclo.

Resumidamente a operação de um dispositivo fotovoltaico, baseia-se em 4 etapas[8]

- A geração de portadores de carga, na iluminação de um semicondutor;
- A separação, recolha e transporte dos portadores de carga de maneira a gerar electricidade;
- Produção de uma diferença de potencial através da célula;
- Dissipação da potência numa carga externa, e nas resistências parasitas.

1.3.5.1 Estrutura e componentes



1. Contacto metálico frontal (*finger*)
2. Contacto metálico traseiro.
3. Material tipo- n .
4. Material tipo- p .
5. Região de depleção (junção $p-n$)

1.3.5.2 Geração de Corrente

A geração de corrente num dispositivo fotovoltaico, ocorre através de dois processos. Tendo em conta, a utilização de semicondutores, é necessário que os fótons incidentes possuam uma energia superior ao hiato do material utilizado para a geração de pares electrão-buraco. No entanto, apesar desta condição, os portadores de carga são meta-estáveis e só existem num estado energético mais elevado, em média, por um período de tempo igual ao tempo de vida dos portadores de carga. Se os portadores se recombinarem, a energia é perdida e nenhuma corrente é produzida e o objectivo não será alcançado.

O segundo processo, envolve a recolha destes portadores pela junção $p-n$ existente no semicondutor, que irá prevenir a recombinação separando fisicamente o electrão da lacuna. Os portadores vão ser separados pela acção do campo eléctrico que existe na junção $p-n$, e caso um portador minoritário achesse a junção $p-n$, é imediatamente arrastado pelo campo eléctrico. Se a célula já se encontrar com uma ligação externa, entre o contacto de base e o de emissão (ligação de curto-circuito, gera uma diferença de potencial), é gerada então uma corrente entre os contactos.

1.3.5.3 Probabilidade de Recolha de Portadores

Como referido no ponto anterior, para a geração de uma corrente eléctrica é necessário que os portadores sejam recolhidos para fazerem parte da geração de corrente.

A “probabilidade de recolha de portadores” descreve a forma de como os portadores de carga absorvidos numa certa parte da célula, podem ser recolhidos pela junção $p-n$ e assim fazerem parte da geração da corrente. A probabilidade de recolha depende principalmente da distância que os portadores têm de percorrer comparada com o comprimento de difusão dos mesmos, e possui também uma dependência face às propriedades da superfície da célula.

A probabilidade de recolha de portadores gerados na zona da junção $p-n$ (zona de depleção) é de 1, uma vez que nessa região o campo eléctrico está no seu máximo, fazendo com que os portadores sejam todos recolhidos para a geração de corrente, enquanto, nas regiões mais afastadas da junção a probabilidade vai diminuindo. Nas situações em que os portadores são gerados a uma distância da junção $p-n$, superior ao seu comprimento de difusão, a sua probabilidade de recolha será consideravelmente baixa.

As características da superfície representam um factor importante no perfil de probabilidades, uma vez que, se o portador for gerado em superfícies com elevado factor de recombinação (acima do factor de recombinação da junção), o portador irá recombinar-se, levando a probabilidade dessas regiões a ser muito baixa[8]

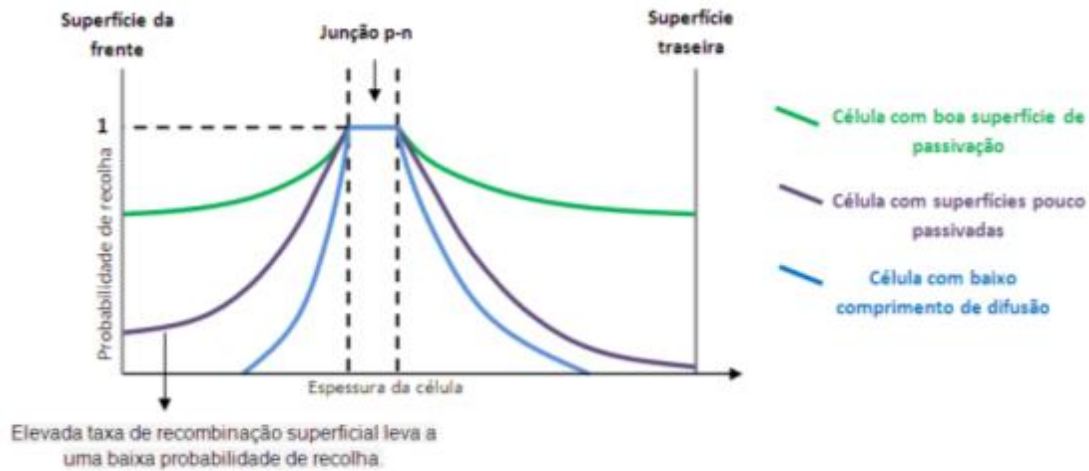


Figura 21 - Impacto das características da superfície e no comprimento de difusão na probabilidade de recolha de portadores numa célula fotovoltaica.

A Eficiência Quântica por seu lado retrata a probabilidade de recolha dos portadores para fazerem parte do fenómeno de condução em função do comprimento de onda (ou energia) dos fótons incidentes sobre a célula. A Eficiência Quântica atinge o valor unitário máximo, se os fótons incidentes na célula forem todos absorvidos, e se os respectivos portadores gerados forem recolhidos para fazerem parte da condução. Na situação inversa, ou seja, obtêm-se valores de Eficiência Quântica nulos em casos onde os fótons incidentes possuam energias abaixo do hiato de energia do material semiconductor.

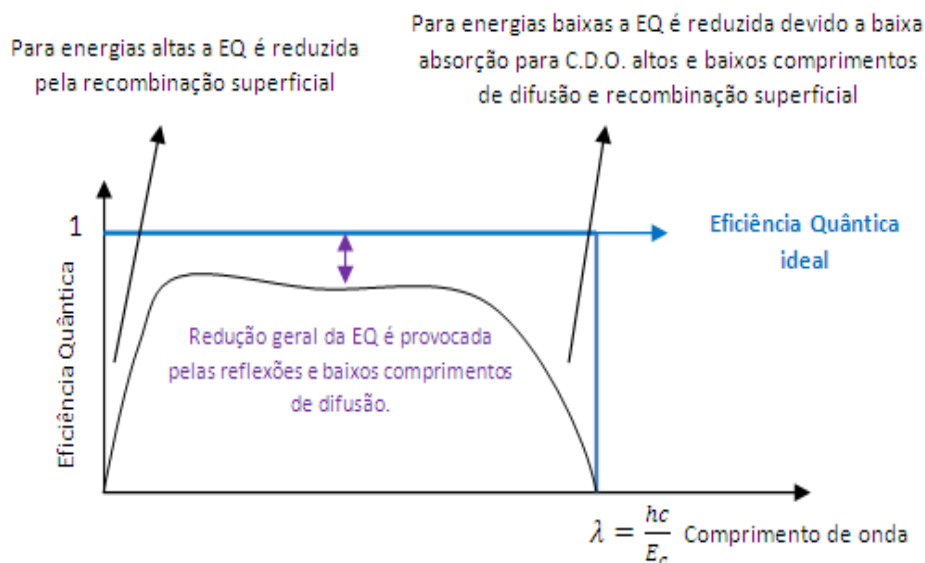


Figura 22 - Eficiência Quântica de uma célula real e as respectivas perdas de eficiência.

Como se verifica na imagem, uma célula solar ideal iria possuir uma EQ de forma quadrada e de valor unitário, mas como na realidade tal ainda não é possível de produzir devido aos efeitos de recombinação, a linha de EQ define a realidade de uma eficiência quântica nas células actuais. Tal como na probabilidade de recolha, os defeitos de superfície, ou, velocidade de recombinação superficial irá afectar a EQ. Desse modo a radiação na gama do azul que é absorvida muito perto da superfície, é altamente afectada pelas condições á superfície, nomeadamente a passivação da superfície. Numa gama mais baixa de energia (região do verde), onde os fótons são absorvidos nas regiões mais próximas da junção, o único factor que impede a EQ de atingir o valor máximo nessa

região é o comprimento de difusão dos portadores. Na região dos vermelhos, que já é próximo do limite mínimo de energia, a condições da superfície traseira irão afectar tal como na gama do azul a EQ, devido à promoção de efeitos recombinativos, tal como, para comprimentos de onda elevados o coeficiente de absorção e o comprimento de difusão são mais reduzidos.

1.3.5.4 Modelo Matemático Equivalente

A representação de equipamentos através de circuitos eléctricos equivalentes é uma técnica muito usada no âmbito da engenharia electrotécnica. Também no domínio dos equipamentos fotovoltaicos se tem usado esta metodologia, com o objectivo de estudar o comportamento destes dispositivos. Nesta secção apresenta-se o modelo matemático de representação e caracterização dos sistemas de PV, a curva característica, ou curva “IV”. [6]

Esta curva representa a variação da corrente eléctrica I , que atravessa o dispositivo exposto á radiação solar, sendo o seu funcionamento representado pelo circuito eléctrico equivalente da Figura 23.

Neste esquema, a resistência série R_s e a resistência paralelo ou “shunt” R_{sh} , representam resistências parasitas associadas aos dispositivos fotovoltaicos reais. Numa célula real, a resistência série (idealmente com valor nulo) representa quedas de tensão devidas á resistência do material semiconductor, dos contactos metálicos e dos contactos metal-semiconductor. Enquanto que a resistência paralelo (idealmente ∞) representa as correntes de fuga através dos bordos da célula, por difusão na fronteira dos grãos e por pequenos curto circuitos entre os componentes metálicos.

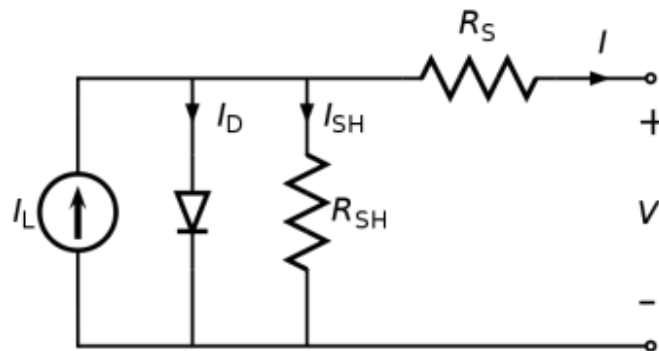


Figura 23 - Circuito eléctrico equivalente de uma célula fotovoltaica.

Através desta equivalência, a curva característica de uma célula fotovoltaica, definida como a variação da intensidade de corrente eléctrica I em função de V , $I(V)$, tendo em conta a equação do díodo ideal de Shockley, apresentada anteriormente, é dada pela seguinte expressão matemática,

$$I = I_L - I_0 e^{\frac{q(V+R_S I)}{nkT}} - 1 - \frac{V + R_S I}{R_{sh}} \quad (XXI)$$

em que I_L , I_0 , n , R_S , R_{sh} são característicos da célula, com:

- I_L corrente gerada pela exposição á radiação solar
- I_0 corrente de saturação ou de obscuridade
- q valor absoluto da carga do electrão
- R_S resistência série
- R_{sh} resistência paralelo ou “shunt”
- n factor de idealidade da célula
- k constante de Boltzmann
- T temperatura absoluta da célula

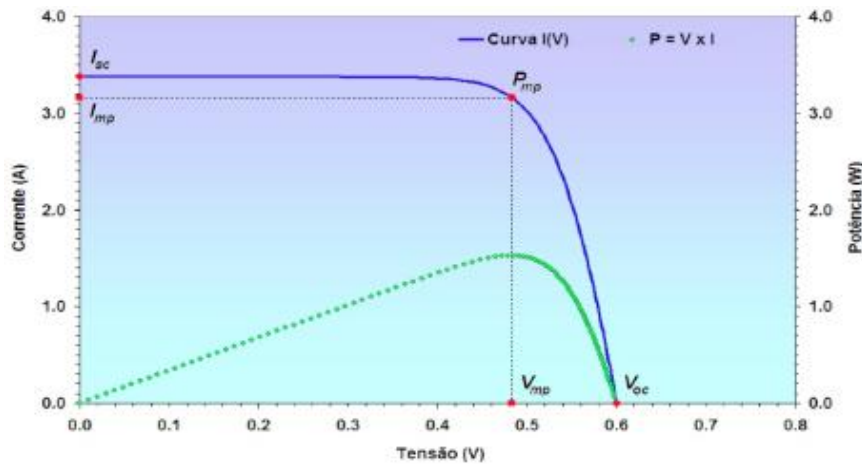


Figura 24 - Curva IV (azul) e de potência (verde) de uma célula fotovoltaica[19]

$$FF = \frac{V_{PM} \cdot I_{PM}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (XXII)$$

Para uma irradiância e temperaturas específicas, a curva IV permite retirar uma série de parâmetros importantes para a caracterização dos dispositivos:

- I_{SC} , corrente de curto-circuito, obtida para $V=0$
- V_{OC} , tensão de circuito aberto, obtida com $I(V) = 0$
- P_{PM} , potência máxima, ponto da curva onde $P = I \cdot V$ é máxima.
- V_{PM} , tensão de máxima potência, ponto onde a potência é máxima P_{PM} .
- I_{PM} , corrente de máxima potência, $I_{PM} = I(V_{PM})$.
- Factor de forma da curva, FF (*Fill Factor*), que está relacionado com a qualidade da junção, da resistência série e da resistência *shunt*.

Na caracterização e comparação entre células e outros dispositivos fotovoltaicos, é utilizado o rendimento η , definido como a razão entre a potência máxima produzida pelo dispositivo e a potência da radiação solar incidente, dada pelo produto da área do dispositivo A , pela irradiância solar incidente G_i .

$$\eta = \frac{P_{PM}}{A \cdot G_i} \quad (XXIII)$$

1.3.5.5 Efeito Resistivo

Como já foi referido anteriormente, os dispositivos fotovoltaicos têm associados aos mesmos, resistências parasitas que afectam a eficiência do dispositivo, dissipando parte da energia nessas mesmas resistências (Figura 23). Numa célula real, as resistências mais comuns são a resistência série (idealmente com valor nulo), e a resistência paralelo (*shunt*) (idealmente ∞). Tanto a magnitude e o impacto da resistência série como a paralelo, dependem da geometria utilizada na célula, fazendo o valor da resistência variar com a área de superfície ($\Omega \cdot cm^2$).

De acordo com o esquema equivalente do módulo, Figura 23, as perdas são representadas por duas resistências, a resistência série, R_s e a resistência paralelo, R_{sh} . A resistência série representa as perdas devido á resistência através do material semiconductor, á resistência entre os contactos metálicos da parte frontal e posterior da célula e resistência devida às conexões entre as células e terminais. As perdas relacionadas com as correntes de fuga que ocorrem nas extremidades e com imperfeições do semiconductor são representadas pela resistência em paralelo.

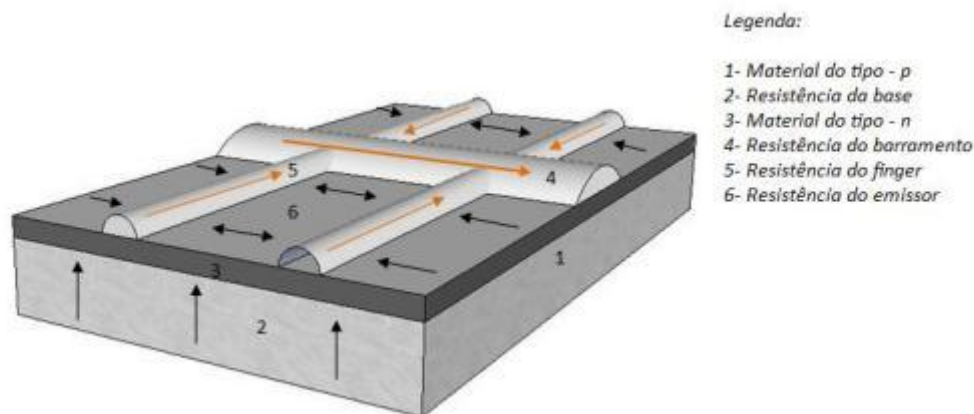


Figura 25 - Esquema das perdas resistivas e os fluxos de corrente

Existe ainda outro tipo de perdas que se relaciona com as diferenças entre IV de cada uma das células do módulo, onde I_{SC} e V_{OC} vão ser ligeiramente diferentes para cada célula.

Como as células são normalmente agrupadas em série num módulo, para aumentar a tensão de saída, a I_{SC} do módulo vai estar limitada pela I_{SC} mais baixa de uma das suas células. Isto faz com que a P_{PM} do módulo seja menor que a soma das P_{PM} de cada célula. O mesmo vai acontecer na associação de vários módulos num sistema. A este tipo de perdas dá-se o nome de perdas por desfasamento ou *mismatch*.

O factor de não uniformidade da irradiância nas células, também causa um outro tipo de perdas. Caso uma célula esteja parcialmente sombreada, esta produz menos que as outras e assim limitando a passagem de corrente, a corrente que essa mesma consegue produzir. Neste tipo de situações, a corrente em excesso proveniente das outras células terá que ser dissipada nessa célula sobre a forma de calor, sobreaquecendo a, e até mesmo danificá-la. Para evitar esta situação, os módulos normalmente têm diodos de *bypass* entre um determinado número de células em série, por exemplo, grupos de 4 células, de forma a fornecer um outro caminho para a passagem de corrente.

De todos estes efeitos, as resistências série e paralelo são as que mais interessam neste trabalho. A resistência série R_s , tem um efeito significativo sobre a curva IV, influenciando o factor de forma, fazendo com que este diminua com o aumento da resistência, como se pode verificar na Figura 26.a). Já a resistência em paralelo, R_{sh} , tem o efeito inverso, fazendo com que o factor de forma aumente com a R_{sh} , tal como se verifica na Figura 26.b).

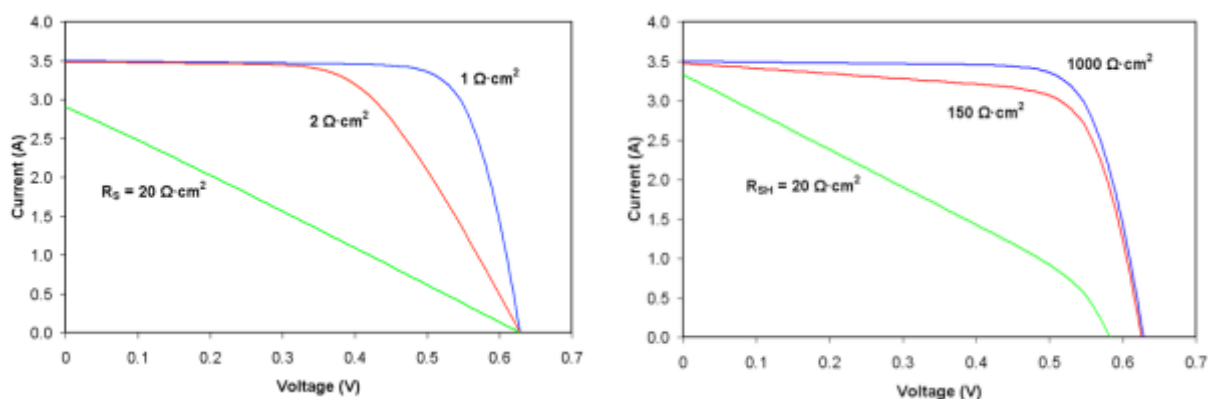


Figura 26 - a) Efeito da resistência série; b) Efeito da resistência paralelo na curva $I(V)$ de uma célula solar.[9]

1.3.6 Tecnologias Fotovoltaicas

O desenvolvimento tecnológico dos sistemas PV deu-se, em grande parte, baseado em células de silício, sendo compostos por células fabricadas a partir de bolachas (*wafers*) de silício, por filmes finos de silício depositados sobre extractos de baixo custo (vidro, acrílico, etc), ou por células orgânicas. Apesar de se apostar continuamente em novos conceitos, o silício cristalino continua a ser a tecnologia onde mais se aposta e onde se acredita que resida o futuro da tecnologia solar fotovoltaica.[20]

Estes três tipos de tecnologias podem ser agrupados da seguinte maneira:

- Módulos baseados em bolachas de silício cristalino.
- Módulos de filmes finos.
- Novos conceitos.

1.3.6.1 Tecnologias de Silício Cristalino

As chamadas tecnologias fotovoltaicas de 1ª geração, ou convencionais, compostas pelas células de silício cristalino, dominam o mercado com um *share* global de 87%[21]. As células de silício cristalino apresentam-se repartidas em dois tipos principais:

- Silício monocristalino, obtido através do corte de um lingote de monocristal de silício, que representa cerca de 35% do mercado.
- Silício multicristalino (ou policristalino), proveniente de um lingote de silício com múltiplos cristais, que corresponde a 49% do mercado.

Na produção de módulos de silício cristalino, tanto mono como multicristalino, podem identificar-se 6 passos distintos:

- I. Extracção de sílica e conversão em silício
- II. Purificação de silício
- III. Crescimento de cristais
- IV. Produção de bolachas de silício
- V. Tratamento das bolachas e impressão de contactos para produção de células
- VI. Montagem do módulo

As células multi-cristalinas apresentam custos de produção mais baixos que as monocristalinas (cerca de 20%), no entanto, atingem valores de rendimento eléctrico também mais baixos do que as suas congéneres monocristalinas. Este facto deve-se á uniformidade da estrutura cristalina resultante da utilização de um cristal único ser ideal para potenciar o efeito fotovoltaico; já as descontinuidades da estrutura cristalina do silício multi-cristalino dificultam o movimento de electrões, o que reduz a potência de saída da célula[21]

O silício é um absorvedor de luz relativamente pobre, o que implica a utilização de camadas de material com espessura de algumas centenas de micron, o que significa uma utilização de material semiconductor não desprezável, face á energia a produzir. No entanto a sua aplicação em células de PV é muito significativa, graças às características de estabilidade obtidas com relativamente bons rendimentos (11% a 16% em células comerciais, cerca de metade a dois terços do máximo teórico) que beneficiariam do vasto conhecimento acumulado na indústria da micro-electrónica.



Figura 27 - a) Célula de silício monocristalino; b) Célula de silício multicristalino

No passado mais recente, a produção em massa de células solares aumentou significativamente de maneira a atender a crescente requisição de sistemas fotovoltaicos. De entre os sistemas fotovoltaicos instalados no mundo, cerca de 90% são de silício cristalino, especialmente o multicristalino (multi-Si) que revela características de baixo custo com alta eficiência.

1.3.6.2 Tecnologias de Filmes finos

Na produção de módulos fotovoltaicos a partir de filmes finos, o silício ou outro material semicondutor, é depositado em substratos de grande área (plástico, vidro ou metal) dando origem a módulos fotovoltaicos.

A materiais cujos átomos não obedecem a nenhuma estrutura cristalina em particular, dá-se o nome de materiais amorfos, e por isso módulos de silício produzidos por esta técnica denominam-se de módulos fotovoltaicos de silício amorfo (a-Si). Dado a sua estrutura não ser uniforme, o silício amorfo tem defeitos tais como átomos com ligações em aberto. Estes defeitos fornecem um local onde os electrões livres na camada de condução de silício por acção do efeito fotovoltaico, se podem recombinar com uma lacuna, deixando de contribuir para a corrente eléctrica que se estabelece quando a este material semicondutor se aplica uma diferença de potencial. A forma de ultrapassar este problema é depositar silício para que contenha uma pequena parcela de hidrogénio, cujos átomos se vão combinar com muitos átomos de silício que tenham ligações em aberto. A este tipo de silício, dá-se o nome de silício amorfo hidrogenado (a-Si:H).

O processo de deposição de silício tem um custo mais baixo que a técnica comum de silício cristalino, pois requer quantidades mais pequenas de material e tem um consumo de energia para a produção mais baixo. A espessura de material semicondutor utilizada nos filmes finos, é na ordem de $1\mu\text{m}$ contra os típicos $200\mu\text{m}$ das tecnologias de silício cristalino.

A eficiência dos módulos de silício amorfo decai com a exposição solar, é por isso necessário deixar que estabilizem durante um período inicial, poucos meses, e só então medir a sua eficiência estabilizada. Esta eficiência é a que deve ser utilizada para o cálculo da produção energética do módulo.

Os materiais mais utilizados são o Telureto de Cádmio (CdTe), com 8% do mercado, o silício amorfo (s-Si), com 5%, e o Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio (CIGS) com menos de 1%.

Estas tecnologias de filmes finos, chamados de 2ª geração, têm experimentado um crescimento acentuado nos últimos anos, guiado, essencialmente, pelo grande potencial de redução de custos que apresentam, mas também pela maleabilidade e flexibilidade dos processos de fabricação. Reside ainda o factor do enorme potencial de crescimento, ao qual todas as previsões indicam acentuar-se nos próximos anos. No entanto subsistem algumas questões por responder: Qual é o potencial de as tecnologias de filmes finos serem disruptivas, face às tecnologias de silício cristalino, que actualmente detêm cerca de 85% do mercado? Se as tecnologias de filmes finos forem disruptivas, qual a

tecnologia que será capaz de o fazer? Que novos desafios se colocarão á tecnologia dos filmes finos, á medida que a tecnologia amadurece e penetra no mercado[20][2]

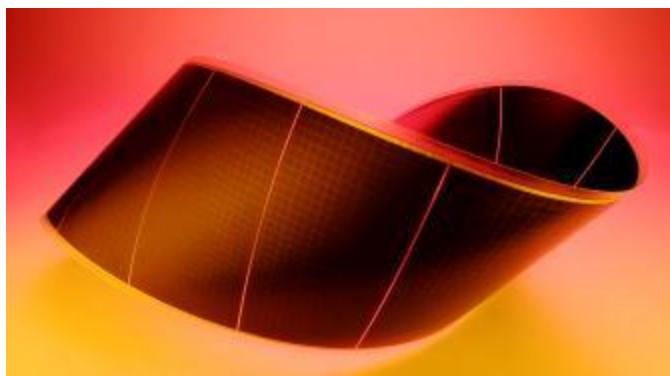


Figura 28 - Célula de silício de filmes finos com substrato flexível

1.3.6.3 Tecnologias de Multijunção e Orgânicas

1.3.6.3.1 Células com Multijunção

O caminho mais explorado para aumentar o rendimento das células fotovoltaicas tem sido a utilização de várias junções p-n, cada uma delas sintonizada com uma região específica do espectro solar.

Para além do silício, outros elementos têm sido utilizados na produção de células de PV com princípio de funcionamento semelhante, mas até agora sem sucesso comercial. De entre estes destacam-se, pela sua importância, os compostos pertencentes aos grupos III e IV da tabela periódica, nomeadamente o GaAs e o InP, utilizados em células, ditas de junção simples, de alta eficiência (superiores a 20%).[2]

Como a radiação apenas interage fortemente com estruturas que tenham tamanhos semelhantes aos seus comprimentos de onda, uma vez que as camadas das células triplas se mantêm extremamente finas, elas irão ser praticamente transparentes às frequências mais baixas. Permitindo assim que as camadas sejam sobrepostas e que a sua ordem seja que no topo esteja a camada que capta as frequências mais elevadas e no fundo a camada que capta as frequências mais baixas.

Na generalidade das células de multi-junção, é utilizado o sistema de três camadas, na camada de topo sintonizadas para o azul, a camada central para o amarelo e a inferior para o vermelho. É importante que os semicondutores a serem utilizados, possuam a capacidade de serem afinados para frequências específicas tal como no caso do GaAs.

Nas células feitas á base de junções de Arseneto de Gálio, de Índio e de Germânio atingem-se rendimentos superiores a 35%. Naturalmente que estas soluções aumentam, além da estabilidade e valor da eficiência eléctrica, também a complexidade e o custo do processo de fabrico, justificando-se apenas em aplicações que exijam a maior potência com a menor área e menor peso, por exemplo em aplicações espaciais[2].

1.3.6.3.2 Células Fotoquímicas e Orgânicas

Células sensibilizadas por corante

As células sensibilizadas por corante (*DyeSensitizedCells* - DSC), também conhecidas como células de Gratzel, são compostas por um eléctrodo de Dióxido de Titânio (TiO_2), com corante, obtido a partir de um complexo metálico de Ruténio ou Osmónio, sobre um vidro coberto por Óxido de Estanho (SnO_2), dopado com Flúor, um eléctrodo de Platina, e um electrólito. Sendo de produção pouco custosa, ainda não é certo qual será o futuro deste tipo de células, muito devido á dificuldade de manter o electrólito vedado ao ar.[2]

Células orgânicas

Sendo ainda de estudo e desenvolvimento recente, as células orgânicas utilizam pigmentos orgânicos como dadores e receptores de electrões e buracos, ao invés de junções p-n. Com eficiências máximas de 7-8%, as células orgânicas têm a vantagem de recorrer a materiais económicos, mas a desvantagem clara de ocupação necessário para níveis de potência de saída semelhantes á concorrência[2].

1.3.6.4 Rendimento de Células e Respectivas Tecnologias

Desde os primórdios do estudo da tecnologia PV que se tenta encontrar os limites de rendimento teóricos, de forma a guiar a investigação na área. O rendimento da conversão fotovoltaica está fortemente relacionado com a geração de pares electrão-buraco causada pela irradiância na célula, e pela sua recombinação antes que alguma corrente possa ser extraída através de um circuito externo. Esta recombinação deve-se a vários mecanismos e não é facilmente relacionável com o tipo de material utilizado na célula.

Actualmente o rendimento máximo obtido pertence às células de multi-junção com concentração, cujo rendimento máximo medido em laboratório se encontra nos 42,4%, como se pode verificar na Figura 29. Neste momento já existem no mercado células de tripla junção com rendimentos acima dos 40% para concentrações na ordem das 500 vezes[22].

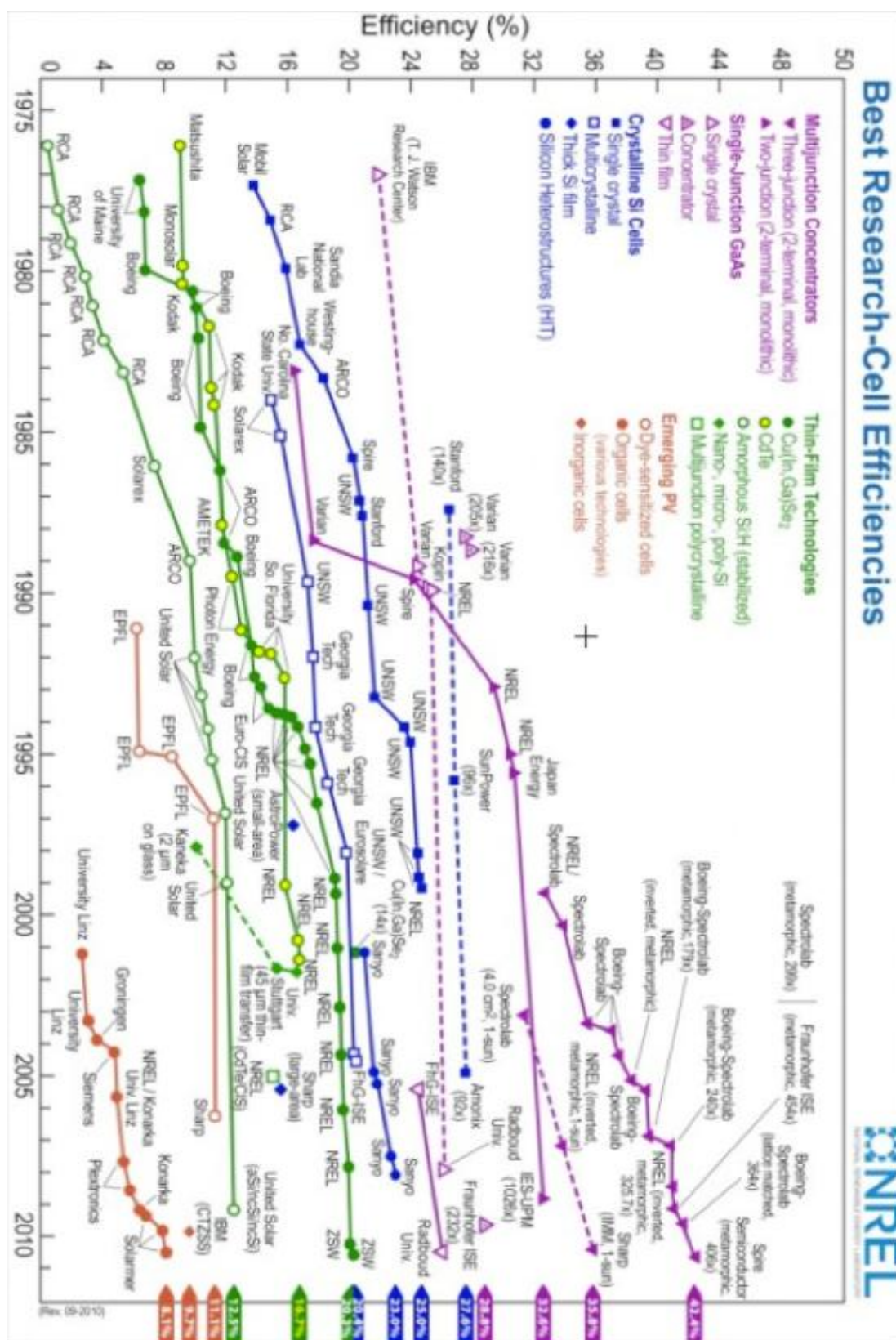


Figura 29 – Evolução dos rendimentos testados em laboratório de diferentes tecnologias fotovoltaicas[22].

No caso do silício mono-cristalino e multi-cristalino, os melhores rendimentos actualmente alcançados são, 27,6% e 20,4% respectivamente, enquanto que para o silício amorfo é possível chegar aos 12,5%. Para tecnologias de 2ª geração, para os filmes finos de CIGS (CuInGaSe_2) e Telureto de Cádmio (CdTe), o melhor que se obtém de momento é 20,3% e 16,7% respectivamente (Figura 29)

Na tecnologia de células orgânicas, o rendimento mais elevado obtido até agora foi de 8,1% e na tecnologia das células fotoquímicas *DyeSensitised*, esse rendimento alcançou os 11,1%.

Estes valores de rendimento são obtidos em laboratório, sob condições controladas e para apenas uma única célula. A união das células em módulos fotovoltaicos prontos a comercializar, vai levar a que surjam perdas por *mismatch* porque estas não são exactamente iguais umas às outras nem têm os mesmos parâmetros, e dando a ligação em série das mesmas, a célula de menor produção irá limitar a produção de todas as outras, levando o rendimento do módulo a ser mais reduzido que o rendimento individual das células[22].

1.3.7 Caracterização da Tecnologia

De maneira a obter uma eficiência elevada em processos de produção em massa, é necessário e imprescindível que se transmita rapidamente às linhas de produção, um feedback e uma avaliação precisa da performance das células. Geralmente as células produzidas e /ou módulos são inspeccionados basicamente através de uma análise do desempenho da corrente/tensão de saída num ambiente simulado de luz solar. Para uma análise mais detalhada do desempenho de uma célula, o parâmetro mais importante a monitorizar é o comprimento de difusão das cargas minoritárias (ou o seu tempo de vida), que regulam a eficiência da recolha de portadores.

A caracterização de células solares fotovoltaicas pode ser distinguidas em 3 diferentes tipos[8].

1. *Full Area Measurement;*

Neste tipo de caracterização a análise de uma *wafer* completa ou só de uma porção da mesma, é feita através da recolha de dados de um único ponto por *wafer* ou por porção. O problema deste tipo de caracterização, é o facto de não ser possível fazer uma análise espacial total da *wafer*.

Actualmente as três técnicas básicas aliadas a este tipo de análise são:

- Iluminação IV, onde a célula é iluminada á intensidade de um Sol e os parâmetros básicos da célula são medidos,
- *Dark IV*, célula sem qualquer tipo de iluminação (escuras), e é traçada a curva IV característica da célula,
- Curva característica de J_{SC} - V_{OC} , com recolha dos valores de V_{OC} e da I_{SC} com níveis diferentes de iluminação.

2. *Mapping;*

Nas técnicas de *Mapping*, são elaboradas medições ponto a ponto num varrimento pela superfície da *wafer*. São capazes de conseguir uma elevada sensibilidade em cada ponto de análise na célula, revelando defeitos, tais como fronteiras de grão e outras imperfeições. O lado negativo desta técnica, é o tempo necessário para cobrir uma célula inteira para se elaborar uma análise completa. Tempos de aquisição mais elevados, geralmente tornam a técnica de *mapping* indesejada para a elaboração de caracterizações lineares.

- **LBIC:** *Light Beam Induced Current*, é um sistema onde um laser é utilizado para fazer o varrimento da superfície de uma *wafer*, e é lida uma corrente em cada ponto de contacto. Devido ao tempo necessário para uma análise bidimensional, utiliza-se geralmente para varrimentos de uma linha de dados.

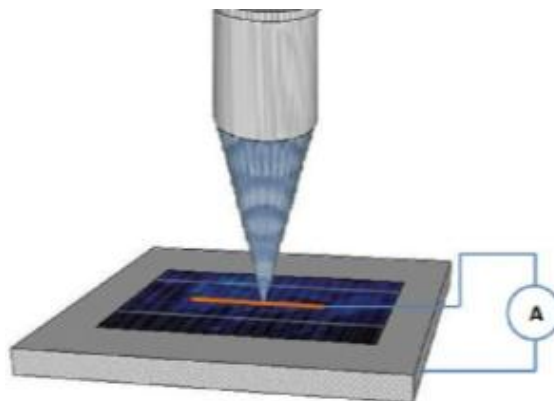


Figura 30 - Esquema de funcionamento da técnica LBIC.

- **μ PCD:** *Microwave Photo-conductance Decay*, é uma técnica que analisa a reflexão de um feixe de micro-ondas num ponto da superfície da amostra, é muito usual na determinação de tempos de vida de substratos, no entanto, para se obter um valor preciso do tempo de vida precisa de uma boa passivação da superfície dado que os tempos de vida obtidos com esta técnica são os valores efectivos e não de *bulk*.

Esta técnica elabora uma análise á fotocondutância por reflexão de microondas, onde a geração de portadores é feita por meio de um impulso intenso mas curto de radiação laser, sendo a variação da condutividade medida através da detecção da radiação de microondas reflectidas na amostra. A variação entre os sinais reflectidos na amostra é proporcional á condutividade do material e portanto também á densidade de portadores em excesso.

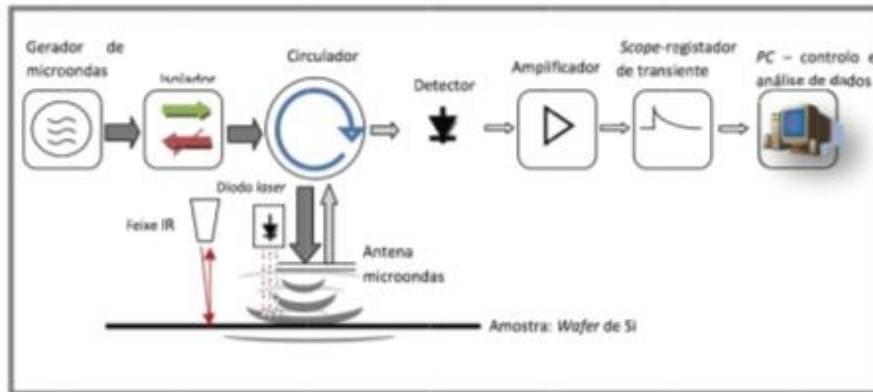


Figura 31 - Esquema de funcionamento da técnica de μ PCD.[18]

É pouco utilizado para uma análise bidimensional devido ao tempo que é necessário para adquirir uma matriz de dados de toda a superfície. Foi utilizado nesta dissertação como um sistema comparativo e de calibração na caracterização de células solares fotovoltaicas.

3. Imaging

As técnicas de *Imaging*, baseiam-se essencialmente na aquisição de uma imagem da amostra a analisar, após/durante a excitação da amostra, permitindo a aquisição de matriz de vários pontos de dados simultaneamente. A vantagem destas técnicas é o facto de ser possível a aquisição de um elevado número de pontos de dados num curto período de tempo. A desvantagem sempre foi o elevado custo dos sensores fotográficos.

A “força” destas técnicas tem vindo a crescer com o aparecimento de novas cameras de silício CCD (Charge Coupled Device) de baixo custo, em tudo semelhantes às cameras digitais comuns.[8]

As técnicas actualmente mais famosas e debatidas na comunidade científica relativa a este tipo de caracterização, são a Fotoluminescência (FL) e a Eletroluminescência (EL).

1.3.7.1 Técnicas de Luminescência

A luminescência é um fenómeno na qual ocorre emissão de luz de certos materiais a temperaturas relativamente baixas. Em contraste á luz emitida por corpos incandescentes, como madeira e carvão em brasa, ferro derretido, ou cabos aquecidos pelo efeito de joule.

A emissão de luz não resulta do material se encontrar acima da temperatura ambiente, daí que a luminescência se chame muitas vezes de luz fria.

A excitação é geralmente atingida graças a radiação ultravioleta, raios - x, electrões, campos eléctricos ou energia química. A cor, ou comprimento de onda da luz emitida é determinada pelo material, enquanto que a intensidade depende tanto do material como da energia induzida.

O fenómeno da luminescência ocorre depois de um certo material absorver uma certa quantidade de energia proveniente de uma fonte tais como infravermelhos, radiação raios - x, feixe de electrões, reacções químicas e adiante. Esta energia eleva os átomos do material para um estado excitado, ou seja, um estado mais energético. Uma vez que estes estados excitados são instáveis, o material sofre outra transição de volta ao seu estado natural, e a energia absorvida é libertada na forma de luz, calor ou ambos. Uma aplicação comum da luminescência, são os LED's (Light Emitting Diodes), onde a luminescência é estimulada através da aplicação de uma diferença de potencial nos terminais do díodo.

As aplicações a serem debatidas neste documento baseiam-se na recolha de imagens de luminescência provenientes da emissão de fotões resultante da passagem de electrões de banda-a-banda num material de silício cristalino (recombinação radiativa), emissão essa que possui um espectro específico. Este espectro de emissão caso seja captado por um camera possuidora de um fotodetector (CCD ou InGaAs), pode ser aproveitado para a caracterização do material, dado que a taxa de emissão via transições directas nas bandas encontra-se directamente relacionado a parâmetros cruciais para análises de dispositivos fotovoltaicos, tais como a densidade de portadores electrão-buraco, tempos de vida dos portadores de carga entre outros.

A esta forma específica de luminescência, dá-se o nome de, Eletroluminescência (EL). A Fotoluminescência (FL), outro método de se gerar luminescência, é alcançada através da iluminação de uma amostra por uma fonte de luz externa. A vantagem mais crucial do PL sobre a EL é de que a PL é uma técnica que permite não ter qualquer tipo de contacto físico, entre a fonte de excitação ea amostra. Esta vantagem permite que a técnica de PL seja utilizada em todas as fases de desenvolvimento de uma célula solar, inclusive *wafers* e blocos de silício.

As metodologias de excitação aplicadas nas técnicas de caracterização de células de silício, enquadram-se entre 3 tipos: *Steady-State* (SS) ou método estacionário, *transiente* (TR) ou transiente e *quasi steady-state* (QSS) ou quase estacionário.[23]

O método estacionário, implica a utilização de uma fonte de energia capaz de uma excitação homogénea e constante, sendo o transiente composto por uma fonte de iluminação caracterizada por impulsos intensos mas curtos e o método quase-estacionário aplica sobre a amostra um impulso longo e com um decaimento prolongado no tempo. Todos estes métodos são considerados válidos, e nenhum se pode considerar melhor que o outro, são no entanto específicos para diferentes tipos de caracterização, isto devido ao impacto que têm sobre o perfil de distribuição dos portadores minoritários sobre a amostra.

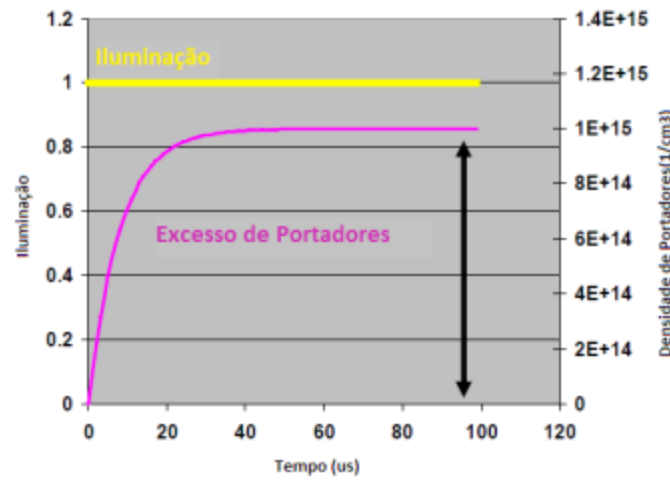


Figura 32 - Condições de excitação no método estacionário (SS).[23]

No método estacionário, as condições impostas á superfície excitada levam á constante geração de portadores junto da superfície, permitindo assim que os tempos de vida registados á superfície se integrem nas medições dos tempos de vida efectivos do sistema[16] A integração destes tempos de vida, incorre no facto de nestas condições existir uma minimização do factor recombinativo naquela superfície, podendo o mesmo ser desprezado. Nas técnicas utilizadas nesta dissertação, apenas se recorreu a este método para a excitação das nossas amostras, por essa mesma razão não se irá explorar de um modo mais aprofundado os outros métodos.

A Eletroluminescência e a Fotoluminescência têm-se revelado como técnicas experimentais capazes de medir a distribuição espacial do comprimento de difusão e do tempo de vida de células solares de silício. Uma vantagem característica destas técnicas, é de que o tempo de aquisição de imagens de luminescência de alta resolução, pode ser da ordem de 1seg.[14], [23]

A elegância característica destas técnicas, é de que a intensidade de luminescência é medida com um único disparo de uma camera com resolução na ordem do Megapixel, permitindo assim medidas das variações da intensidade através de toda a amostra com alta resolução espacial. Após a medição da intensidade da luminescência emitida pela amostra, é então elaborada uma análise pixel a pixel da imagem, permitindo que sejam obtidas imagens de alta resolução do comprimento de difusão e do tempo de vida dos portadores.

Tal como referido anteriormente, a excitação de um semiconductor provoca a geração de portadores de carga, podendo a redistribuição dos portadores ao longo da amostra ser representada pelo seguinte modelo[14] para radiação que penetra profundamente na amostra, geração homogénea.

$$n_e(x) = n_e(0) \frac{1+r}{1-r} \frac{1}{1+r} e^{\frac{x}{L_e}} + \frac{1+r}{1-r} \frac{1}{1+r} e^{-\frac{x}{L_e}} \quad (\text{XXIV})$$

1.3.7.1 Fotoluminescência, PL,

Tal como referido no capítulo prévio, a luminescência atinge-se com a excitação energética de um material semiconductor. No caso da técnica de fotoluminescência, a excitação fica a cargo de uma fonte de luz, mais especificamente, de uma laser. Na técnica de PL, a amostra no geral ou uma grande porção da mesma, é iluminada homogénea e continuamente (método estacionário) numa das superfícies e a imagem de luminescência gerada é então capturada por meio de uma camera equipada com um fotodetector. A geometria relativa á iluminação tem sido alvo de muita discórdia, tendo já alguns autores divulgado *papers* com as diferentes geometrias, iluminação frontal ou traseira[14], [17], [24–27] Na iluminação frontal, a iluminação é feita na mesma superfície de onde se irá colectar a imagem de luminescência, já na iluminação traseira a iluminação incide sobre a superfície contrária á de medição. Este ponto será abordado com maior ênfase no capítulo Sistema Experimental.

Tal como vem descrito no capítulo de luminescência onde se elaborou o modelo de distribuição dos portadores ao longo da espessura da amostra, a fotoluminescência segue esse mesmo modelo existindo apenas um factor que a diferencia das outras técnicas, o método de injeção de portadores em excesso. Na fotoluminescência a injeção é feita por meio de um laser, laser esse que tem como características de saída, uma dada potência e um certo comprimento de onda (radiação monocromática).

Para se conhecer o número de portadores em excesso que o laser injecta no material, é preciso elaborar cálculos para se obter de uma potência de saída, um fluxo de electrões.

$$\text{Irradiância} \frac{W}{m^2} = \frac{P_{out}}{Area} \quad (XXV)$$

$$\text{Irradiância} \frac{W}{m^2} = \Phi \frac{n.fotões}{m^2.s} \cdot \frac{h.c}{\lambda} \frac{J.s.m.s^{-1}}{m} \quad (XXVI)$$

$$\Phi \frac{n.fotões}{m^2.s} = \frac{\text{Irradiância} \frac{W}{m^2}}{\frac{h.c}{\lambda} \frac{W.m.s^{-1}}{m}} \quad (XXVII)$$

Assumindo que na superfície, cada fotão incidente automaticamente gera um portador, iremos obter no lugar de Φ que representa o fluxo de fotões incidente, o fluxo de portadores gerados na superfície da amostra. No modelo de distribuição da densidade de portadores $n_e(0)$ corresponde ao número de portadores injectados.

$$\Phi \frac{n.portadores}{m^2.s} = \frac{\text{Irradiância} \frac{W}{m^2}}{\frac{h.c}{\lambda} \frac{W.m.s^{-1}}{m}} \quad (XXVIII)$$

Nos trabalhos de fotoluminescência, a injeção de portadores extras por meio de um laser de infravermelhos, gera uma dependência do perfil de geração de portadores em função da profundidade, o que se revela complicado de descrever e analisar através do modelo teórico previamente demonstrado. Por esta mesma razão e apesar de o modelo estar correcto, para uma melhor análise do comportamento deste perfil, recorreu-se ao software de simulação PC1D[14].

Através da modelação no PC1D, foi possível gerar diferentes perfis, fazendo variar o tempo de vida dos portadores no interior da amostra, a dopagem feita na amostra, a intensidade do laser, a velocidade de recombinação á superfície.

O PC1D, é o software de simulação de células solares mais utilizado de entre os disponíveis. O seu sucesso vem da sua rapidez de processo, interface acessível, de rápida compreensão e a sua constante actualização e do facto de se encontra para download livre.

A utilização do PC1D, implica um processo de 3 etapas:

1. Inserir os inputs da simulação
2. Executar a simulação
3. Examinação dos resultados

Na etapa dos *inputs* dos resultados, necessitamos de inserir uma série de dados de acordo com o que pretendemos simular. Pela Figura 33, vemos a interface desta etapa:

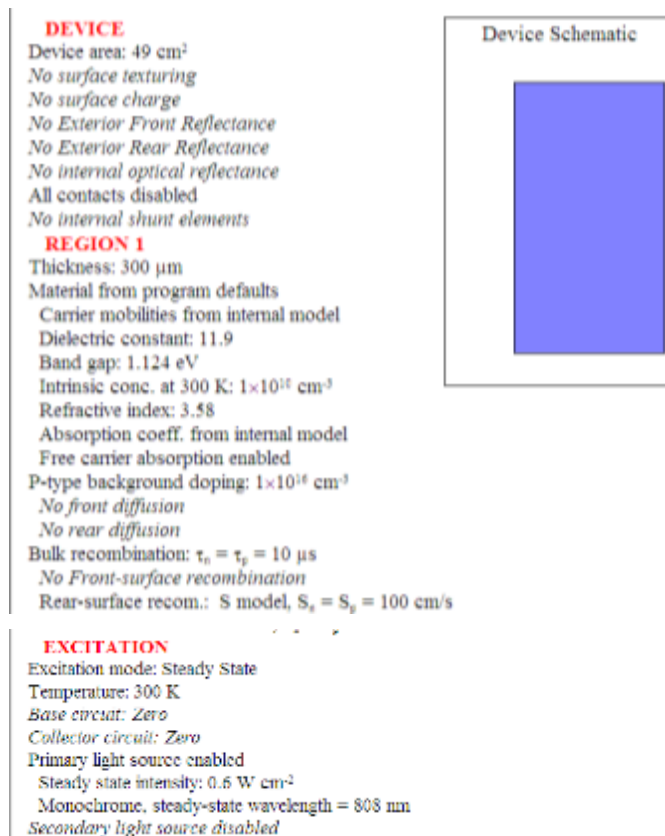


Figura 33 - Interface de inputs para a parametrização da simulação.

Após a aplicação dos dados, e, executando o programa, obtemos a seguinte interface de resultados,

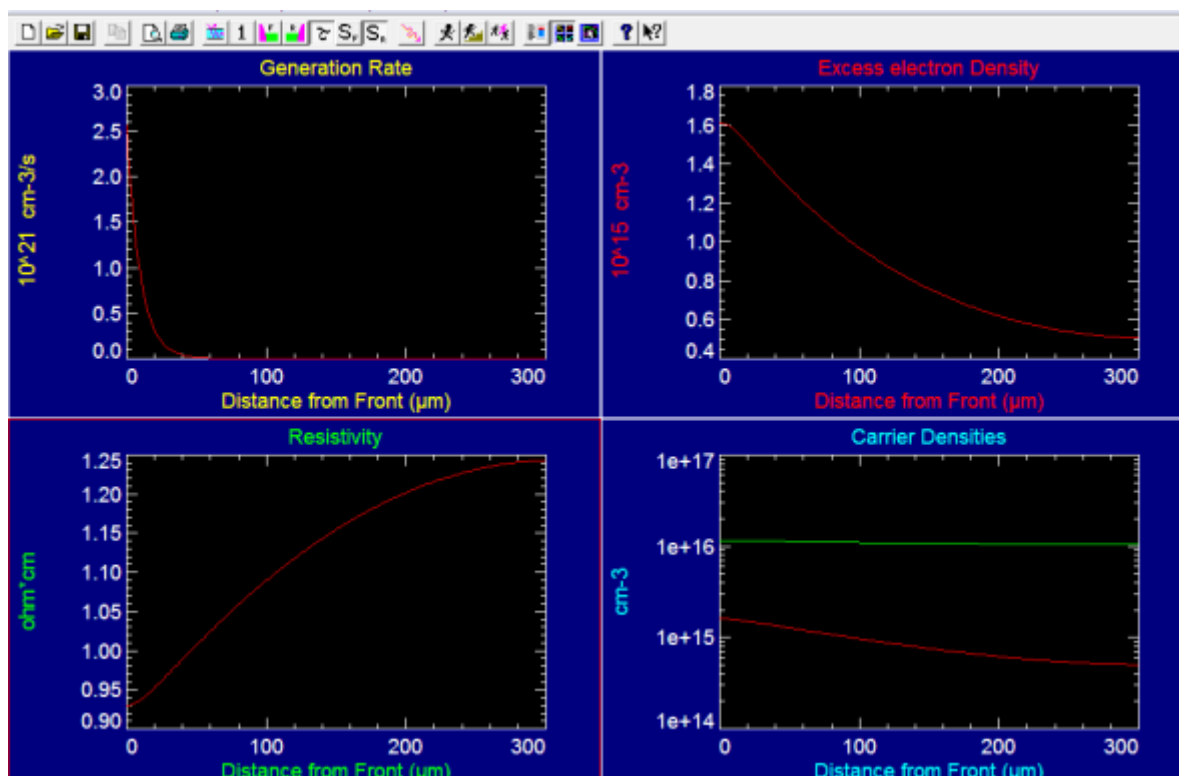


Figura 34 - Interface de resultados do PC1D; leitura de 4 resultados para uma única simulação.

Na Figura 34, podemos ver uma simulação gerada no PC1D, em que na interface de resultados obtivemos diferentes perfis, tais como, a taxa de geração de portadores na amostra, o perfil do excesso de portadores minoritários, a resistividade do material ao longo da amostra e o perfil de densidades dos portadores que será a nossa base de estudo com o PC1D. Podendo de seguida se optar por uma leitura individual de cada gráfico e a extracção dos dados para uma folha de cálculo.

Como condições base para a simulação da Figura 34 e das simulações seguintes, considerámos uma dopagem na superfície de tipo-p da célula solar na ordem dos 10^{16} cm^{-3} , uma espessura de amostra na ordem de $300 \mu\text{m}$, velocidades de recombinação traseira na ordem de $100 \text{ (cm.s}^{-1}\text{)}$, uma iluminação de 808 nm com uma potência $0,6 \text{ W/m}^2$ e um tempo de vida intrínseco de $10 \mu\text{s}$.

Fazendo correr a simulação com estes parâmetros, obtemos os seguintes perfis de distribuição dos portadores minoritários (electrões) ao longo da nossa amostra em função da variação do tempo de vida dos portadores.

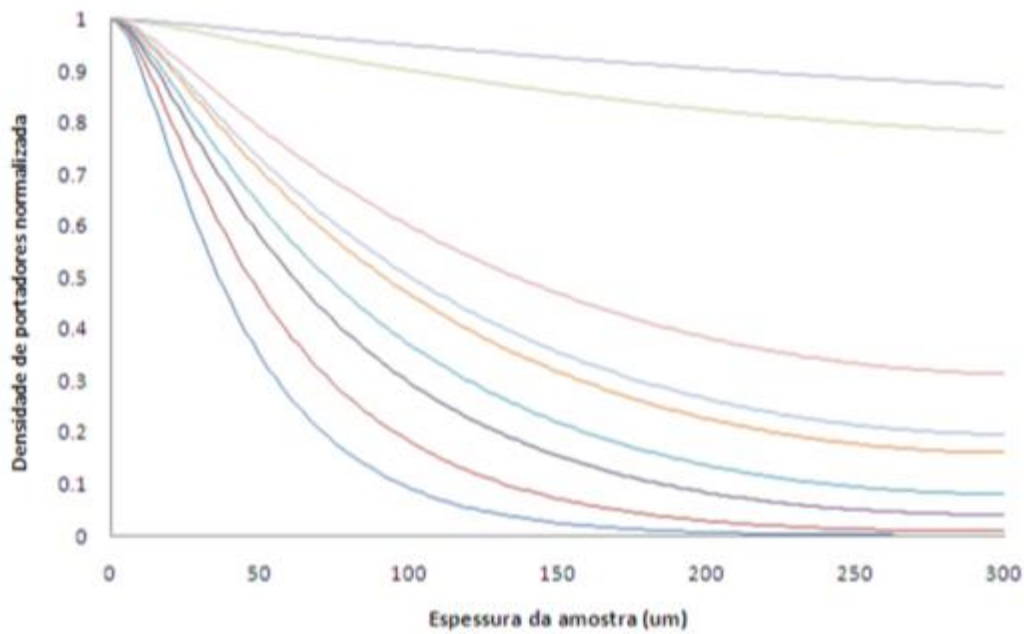


Figura 35 - Perfil de distribuição de portadores minoritários ao longo da espessura da amostra, variando o tempo de vida de 0.5us a 1000us.

Como se pode verificar na Figura 35, existe uma relação entre o tempo de vida e a densidade de portadores minoritários no material. De salientar que à medida que se aumenta o tempo de vida dos portadores, a densidade dos mesmos vai tender para um perfil constante e de valor igual à injeção. Isto deve-se ao facto de para tempos de vida muito elevados, os comprimentos de difusão correspondentes a esses tempos de vida serem superiores à espessura da nossa amostra, não existindo a possibilidade de ocorrência de recombinação na amostra.

Fazendo variar nas simulações os factores de tempo de vida, dopagem, potência injectada e velocidade de recombinação superficial, é possível compreender melhor a física por detrás deste fenómeno. E assim obter-se os seguintes perfis.

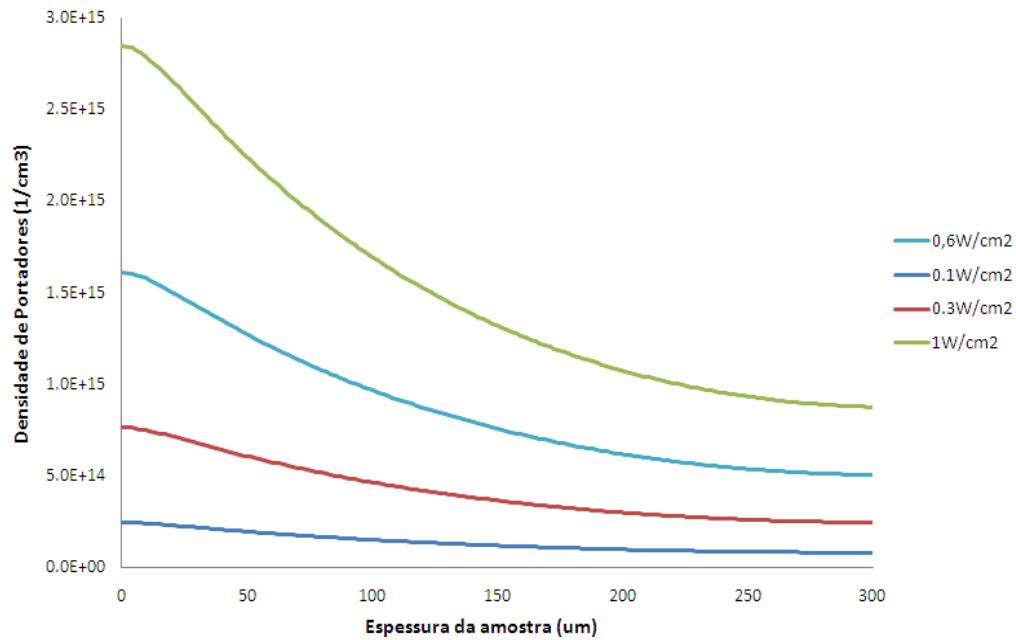


Figura 36 - Perfil de distribuição dos portadores minoritários em função da potência injectada do exterior (fotoluminescência).

Na simulação de diferentes potências injectadas na amostra, podemos verificar uma variação proporcional em função das diferentes potências injectadas. Este resultado é bastante natural tendo em conta que a única variável foi somente o número de portadores em excesso na superfície frontal da amostra não envolvendo nenhum factor intrínseco do material, reflectindo-se num aumento por igual dos perfis.

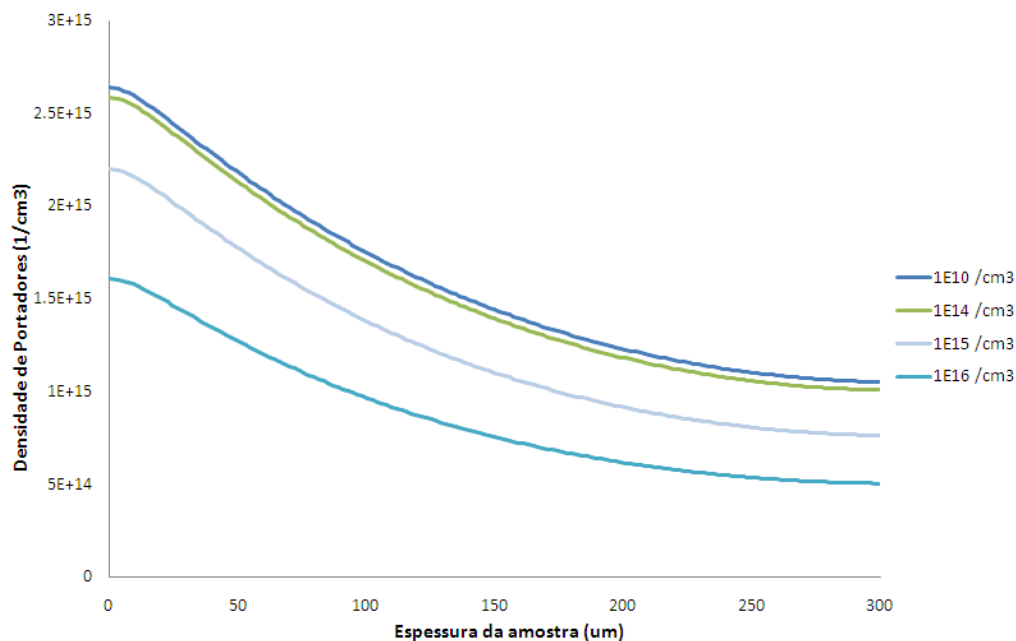


Figura 37 - Perfil de distribuição dos portadores minoritários em função da dopagem (tipo-p) feita na amostra.

De acordo com o perfil gerado na simulação do PC1D, e de acordo com o funcionamento do software, este comportamento onde a dopagem implica uma diminuição na densidade de portadores é causado pela injeção indirecta de defeitos no material semiconductor.

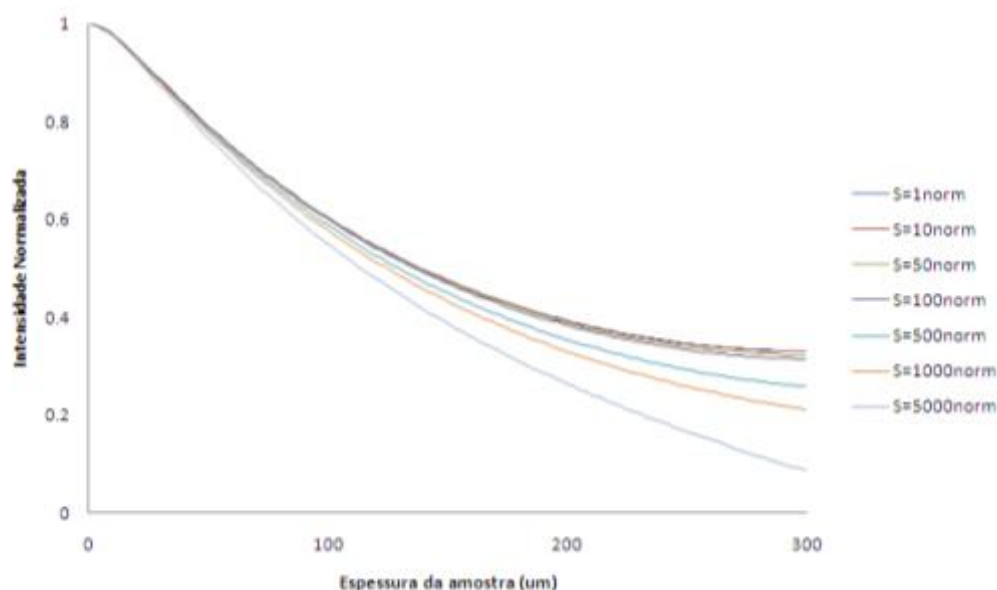


Figura 38 - Perfil de distribuição de portadores minoritários em função da velocidade de recombinação na superfície traseira.

Como se pode visualizar na Figura 38, a variação no perfil só se denota na superfície traseira uma vez que é lá que irá ocorrer o fenómeno de recombinação. De referir que as velocidades de recombinação que suscitam maior interesse são as que de facto influenciam o perfil de distribuição, e que pela simulação é perceptível que somente para valores na ordem das largas centenas e milhares de cm/s é que se denotam variações significativas.

A título de curiosidade, uma vez que no nosso modelo teórico não se contempla a velocidade de recombinação à superfície frontal, com o auxílio da ferramenta de simulação PC1D é possível obter o seguinte perfil

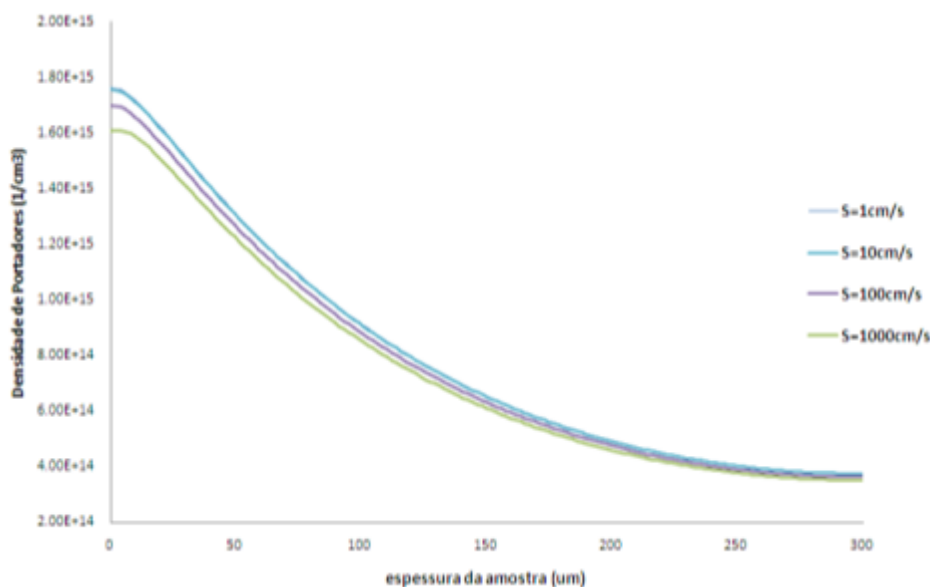


Figura 39 - Perfil de distribuição de portadores minoritários em função da velocidade de recombinação na superfície frontal.

Apesar de não se tornar relevante nos nossos cálculos, é interessante para se conhecer melhor a física em causa. Como se pode verificar, só em casos de velocidades de recombinação muito elevadas ($> 10^3$) é que o perfil de geração é significativamente influenciado, tal ocorre, visto que a velocidade

á qual as partículas se recombinam assim que entram no material é demasiado elevada, logo parte do fenómeno de geração de portadores não tem a possibilidade de ocorrer e daí este tipo de perfil. E como se verifica, para valores de velocidade de recombinação baixos não existem variações relevantes nos perfis. Esta condição de minimização do impacto da velocidade de recombinação nessa superfície deve-se somente ao facto de que a velocidade de recombinação é um fenómeno directamente relacionado com a concentração dos portadores á superfície, sendo inversamente proporcional á mesma (Capítulo 1.3.4.5). Tendo em conta isto, e dado que nestas condições de injeção a concentração nessa superfície é excepcionalmente elevada, os portadores tendem a difundir para longe da superfície diminuindo o efeito da velocidade de recombinação nessa superfície.

Conhecendo o perfil de distribuição dos portadores minoritários na nossa amostra, é então necessário conhecer o fluxo de fotões gerados por recombinação radiativa dos portadores por energia ($\hbar\omega$), sendo dado por; [13], [27][14], [28]

$$dj_{\gamma,em} = \alpha \hbar\omega \cdot \frac{1}{4\pi^2 \hbar^3 c^2} \cdot \frac{(\hbar\omega)^2}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}}} \cdot \frac{n_e n_b}{n_i^2} \cdot d(\hbar\omega) \quad (XXIX)$$

Onde $\alpha \hbar\omega$ é o coeficiente de absorção em função da energia (Anexo I), n_b a dopagem de tipo-p feita no material e n_i a concentração intrínseca dos portadores.

Esta equação descreve e prediz a distribuição espectral da emissão espontânea de fotões dentro da amostra. Esta distribuição [14], [28] seria igualmente detectada no exterior da amostra caso não se contabilizasse a reabsorção no material durante o trajecto de fuga para o exterior da amostra dos fotões gerados.

Para a obtenção do perfil de emissão que é detectado no exterior da amostra, é necessária a contabilização das reabsorções desde o ponto de geração do fotão até á sua saída da amostra, seguindo depois uma integração da emissão espontânea dos fotões ao longo da espessura da amostra.

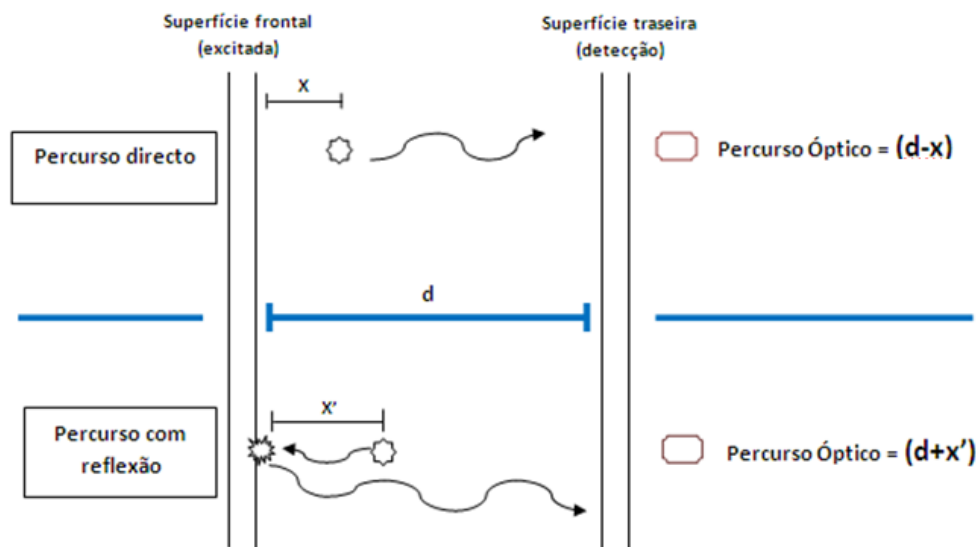


Figura 40 - Percurso óptico para diferentes cenários: Percurso directo desde a geração até á superfície de detecção; Percurso com reflexão na superfície traseira até á superfície de detecção.

Na Figura 40 podemos verificar os diferentes percursos ópticos que os fotões gerados no *bulk* de uma célula percorrem até alcançarem a superfície onde se encontra o detector. A seguinte equação demonstra a relação destes percursos ópticos com a reabsorção dos fotões gerados no *bulk*. [14], [28]

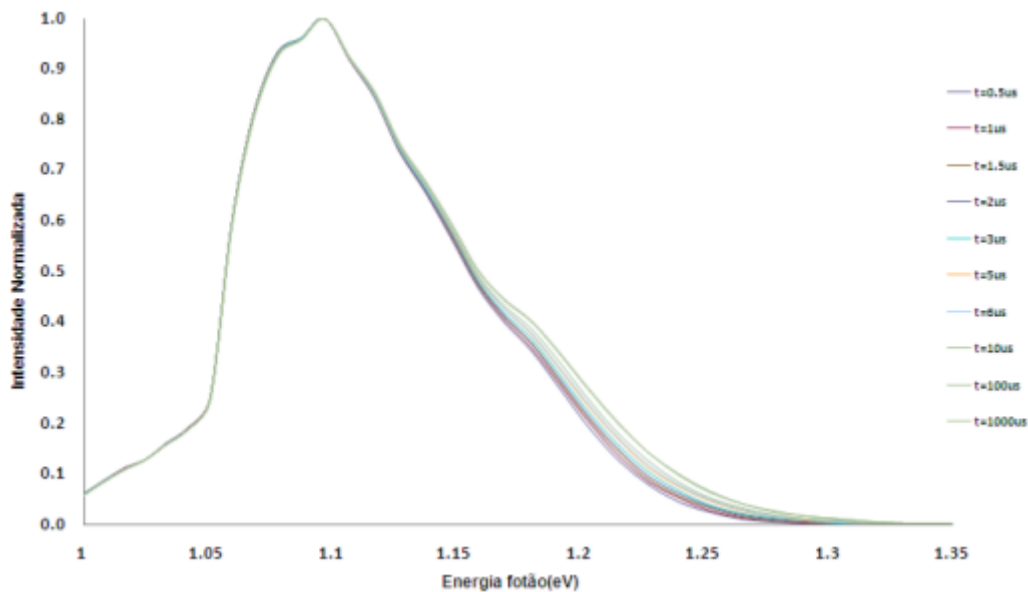
$$\frac{dj_{Y,em}}{d(\hbar\omega)} = 1 - R_f \cdot \int_0^d j_{Y,em} \cdot e^{-\alpha \cdot (d-x)} + R_t \cdot e^{-\alpha \cdot (d+x)} \cdot dx \quad (XXX)$$

Na qual R_f e R_t são respectivamente a reflexão na superfície frontal e traseira na amostra, sendo factores característicos do material. Na técnica de fotoluminescência, as amostras utilizadas são *wafers* de silício e por isso não se irão contabilizar reflexões na superfície traseira nem na frontal, ficando a equação da forma

$$\frac{dj_{Y,em}}{d(\hbar\omega)} = \int_0^d j_{Y,em} \cdot e^{-\alpha \cdot (d-x)} \cdot dx \quad (XXXI)$$

Após a integração desta distribuição ao longo da espessura da amostra, obtemos o perfil de emissão da amostra em função das contribuições de todo o volume da amostra. No entanto este perfil emitido pela amostra não serve para análise com um fotodetector, dado que a intensidade emitida na superfície da amostra não é igual á registada pelo equipamento. É preciso entretanto tomar conta a eficiência quântica da camera (Anexo III), e as perdas ópticas que ocorrem desde um ponto de emissão até á superfície do fotodetector que se encontra no interior do equipamento. No desenrolar desta dissertação deparou-se que os valores fornecidos pelo fabricante da camera estavam errados e eram de outro modelo, no entanto, na comparação entre os dois perfis verificou-se que as diferenças não eram muito evidentes e por isso decidiu-se prosseguir adiante no trabalho.

Para a análise dos perfis de emissão, elaborou-se uma série de perfis de emissão na qual se ia variando o tempo de vida e a velocidade de recombinação superficial tal como nas Figura 35 e Figura 38 se fez o mesmo para a densidade de portadores. Obtendo assim os seguintes gráficos da influência da eficiência da camera.



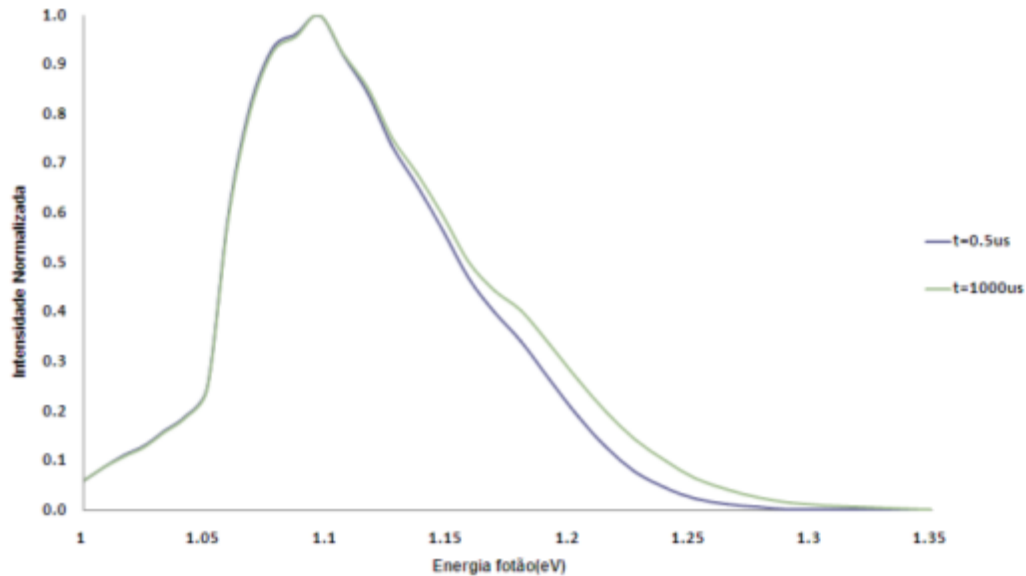


Figura 41 - Perfis normalizados da emissão por fotoluminescência com variação do tempo de vida dos portadores. a) Perfis de emissão resultantes de dez tempos de vida diferentes, variando de $0.5\mu\text{s}$ a $1000\mu\text{s}$; b) Dois perfis obtidos a partir de tempos de vida muito distintos, $0.5\mu\text{s}$ e $1000\mu\text{s}$.

Na Figura 41 é possível verificar as variações nos perfis de emissão para diferentes tempos de vida, sendo de salientar que essa variação apenas seja perceptível nos fótons com as energias mais elevadas. Para compreender melhor esta variação tão específica nos perfis, é necessário entender um pouco o que o diagrama da Figura 40 nos transmite, que no fundo retrata o percurso óptico que um fóton gerado por recombinação radiativa tem de percorrer até atingir a superfície onde o mesmo será detectado. Um fóton gerado numa posição onde $x \ll d$, terá de percorrer um percurso óptico máximo, e tendo em conta o coeficiente de absorção do silício (Anexo I), que nos relata que os fótons com as energias mais altas, irão ser mais rapidamente reabsorvidos, não irão ter a possibilidade de atingirem a superfície detectora. Dado isto, um perfil emissão com um tempo de vida razoavelmente elevado, ou seja, com um comprimento de difusão aproximado à espessura da amostra a ser estudada leva a que a recombinação radiativa desses portadores ocorra perto da superfície de detecção, permitindo aos fótons emitidos numa gama energética elevada não serem reabsorvidos até à sua detecção. No caso inverso, os portadores com tempos de vida reduzidos (baixo comprimento de difusão), irão sofrer o fenómeno de recombinação numa posição onde o percurso a percorrer será máximo, ficando assim sujeitos ao coeficiente de absorção do silício, levando a que somente os fótons de baixas energias sejam capazes de atingir a superfície de detecção. Isto leva a que os nossos perfis sejam somente afectados nas gamas energéticas mais elevadas, levando a região das baixas energias intactas.

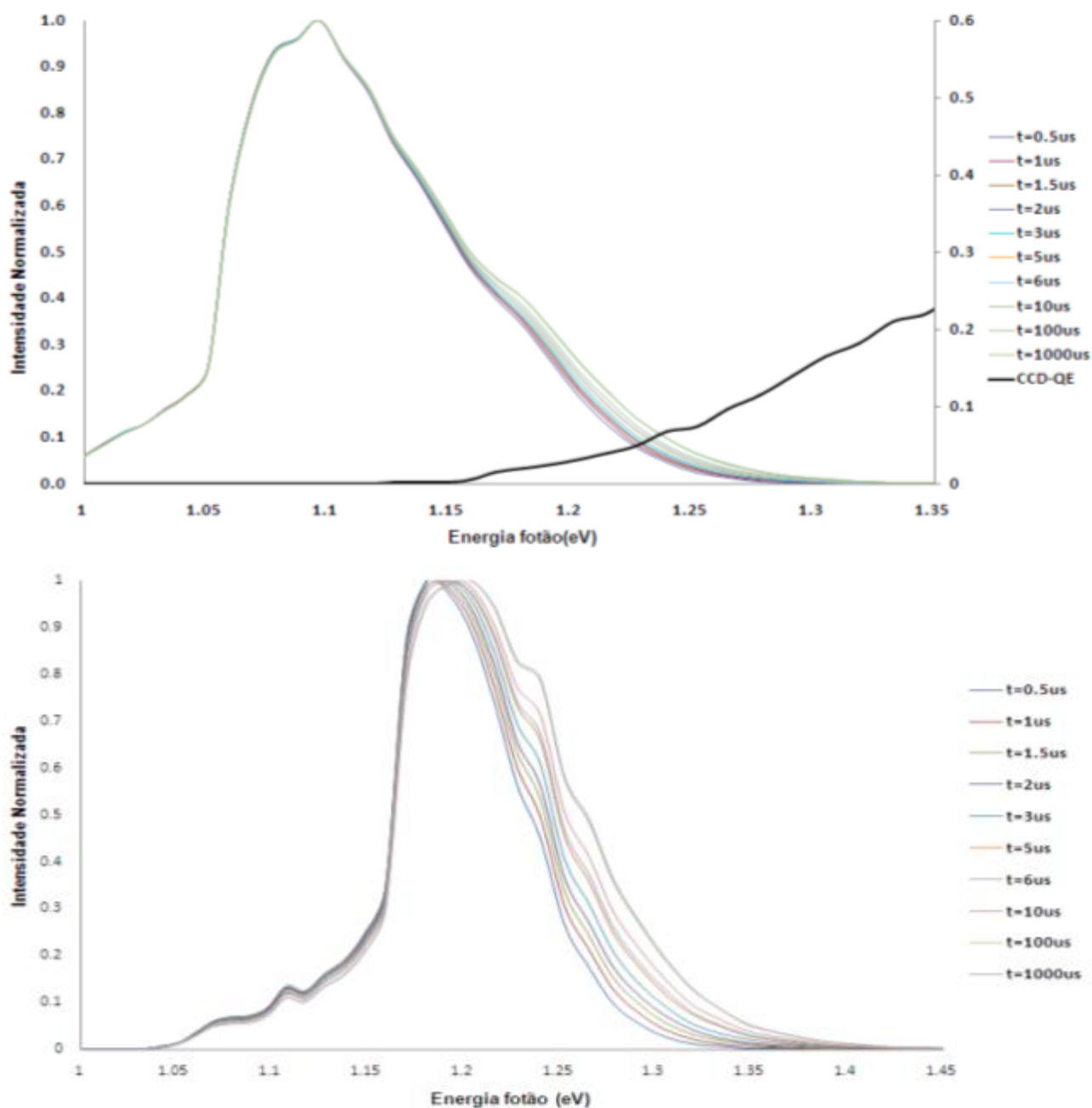


Figura 42–a)Perfis normalizados da emissão por fotoluminescência com a intercepção da eficiência da camera detetora ;b)Perfil de emissão depois de sujeito á eficiência quântica da camera.

Como se verifica na Figura 42 o perfil de emissão, conjugado com a variação da EQ da camera modifica a forma do perfil que é detectado, sendo agora o pico do perfil numa gama de energias mais altas, 1.2eV.

Na análise da influência da velocidade de recombinação, obteve-se os seguintes perfis de emissão por fotoluminescência.

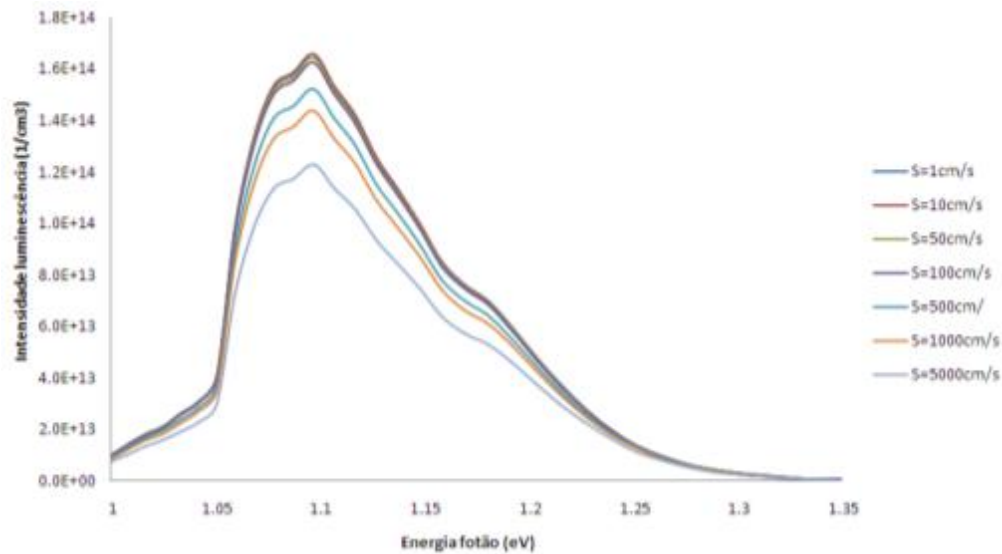


Figura 43 - Perfis de emissão por fotoluminescência com variação da velocidade de recombinação dos portadores na superfície traseira da amostra. Condições base idênticas às simulações anteriores mas com tempo de vida constante de $10\mu\text{s}$.

Tal como se verifica na Figura 43, um aumento na velocidade de recombinação leva à diminuição da amplitude do perfil de emissão por fotoluminescência, mas no entanto o seu impacto na forma do perfil é mínimo e imperceptível graficamente, ao invés de na variação do tempo de vida. O facto de esta influência somente afectar significativamente a amplitude e não a forma, deve-se ao ponto em que a contribuição dos fótons gerados ao longo da espessura da amostra ser igualmente afectada pelas condições à superfície, mais concretamente o aumento da velocidade de recombinação à superfície traseira.

No estudo realizado nesta dissertação, iremos dar atenção à caracterização por análise do tempo de vida, deixando para já de parte o factor de velocidade de recombinação, ficando essa mesma análise para um trabalho futuro.

Após a análise da influência do tempo de vida nos perfis de emissão por fotoluminescência, é necessário contabilizar os impactos existentes nos perfis, desde o momento da sua emissão a partir da superfície da amostra em estudo até à sua detecção junto ao fotodetector.

Para cálculo das perdas no percurso óptico dos fótons emitidos, é preciso ter em conta o percurso da amostra à lente da objectiva da camera, e após a interacção dos fótons com a lente da objectiva iremos assumir que todos os fótons que atingem a lente entram em contacto com o fotodetector da camera Figura 44.

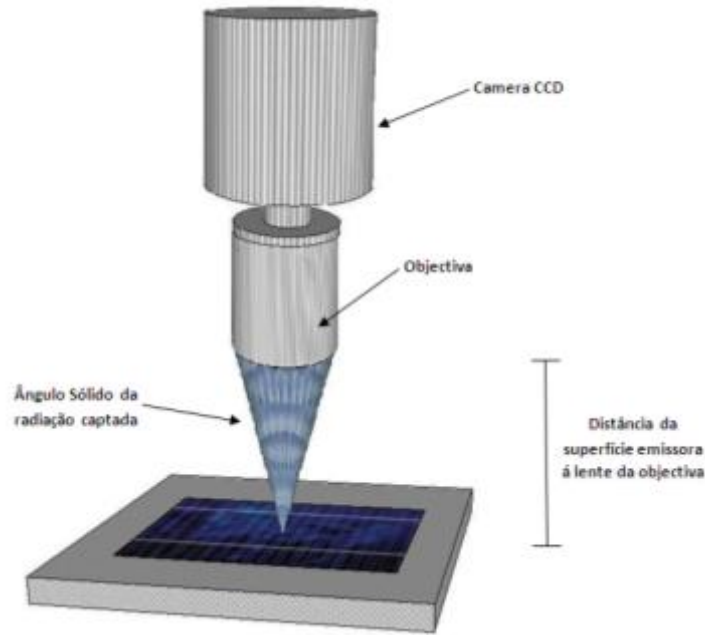


Figura 44 – Interação óptica entre um ponto na amostra e a camera; Ângulo sólido correspondente á radiação captada pela lente emitida da superfície da célula solar.

Vem que, para a emissão de um ponto na amostra a analisar e tendo em conta o perfil isotrópico da radiação, necessitamos de calcular o rácio do perfil (ângulo sólido) que atinge a lente e assim estabelecer um perfil de detecção da camera mais correcto. Obtendo a seguinte relação entre a área “detectora” e área de emissão de luminescência:

$$A_{lente} = \pi \cdot R_{lente}^2 \quad (XXXII)$$

$$A_{esfera\ emissão} = 4\pi \cdot R_{distância}^2 \quad (XXXIII)$$

$$Rácio = \frac{A_{lente}}{A_{esfera\ emissão}} \quad (XXXIV)$$

Através de medições no nosso sistema experimental, definiu-se como raio da lente, $R_{lente} = 3.5cm$, e a distância da superfície emissora á lente, $R_{distância} = 22cm$.

Obtendo o seguinte rácio para o nosso sistema experimental

$$Rácio = 6.3 \times 10^{-3}$$

Aplicando este rácio nos perfis de emissão da amostra, obtemos

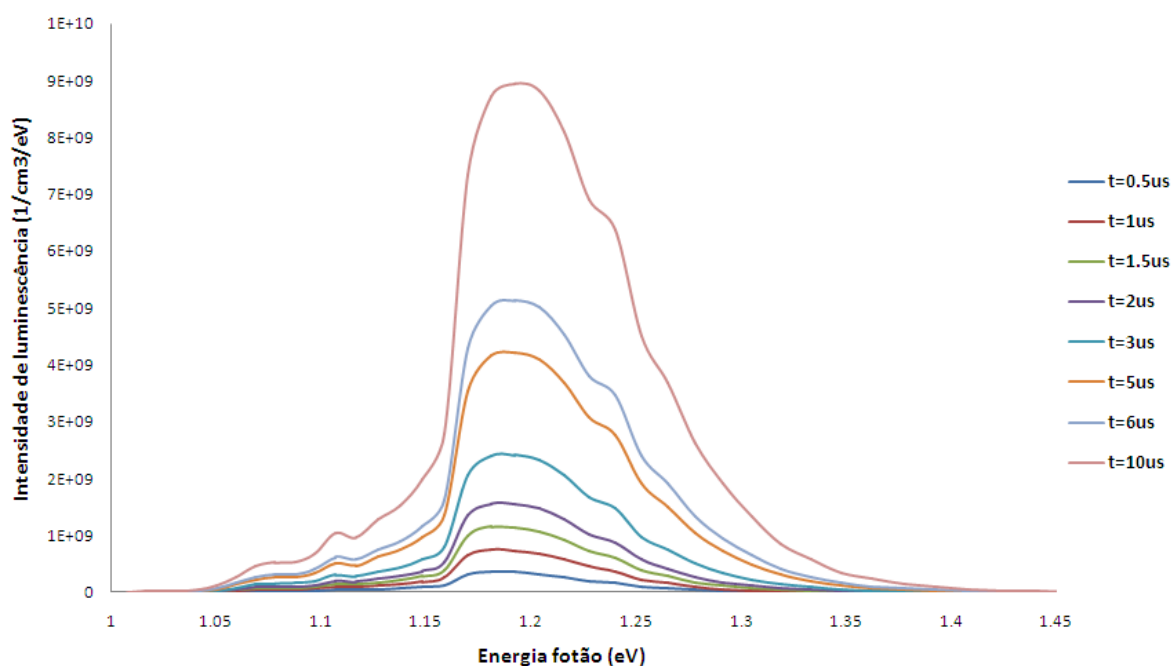


Figura 45 - Perfis de emissão detectados pelo fotodetector da camera em função de diferentes tempos de vida.

Fazendo a integração de cada perfil em função do comprimento de onda de emissão, conseguimos obter valores absolutos de tempo de vida em função do número de fótons captados pela camera, resultando na seguinte relação entre a intensidade de iluminação e o tempo de vida característico

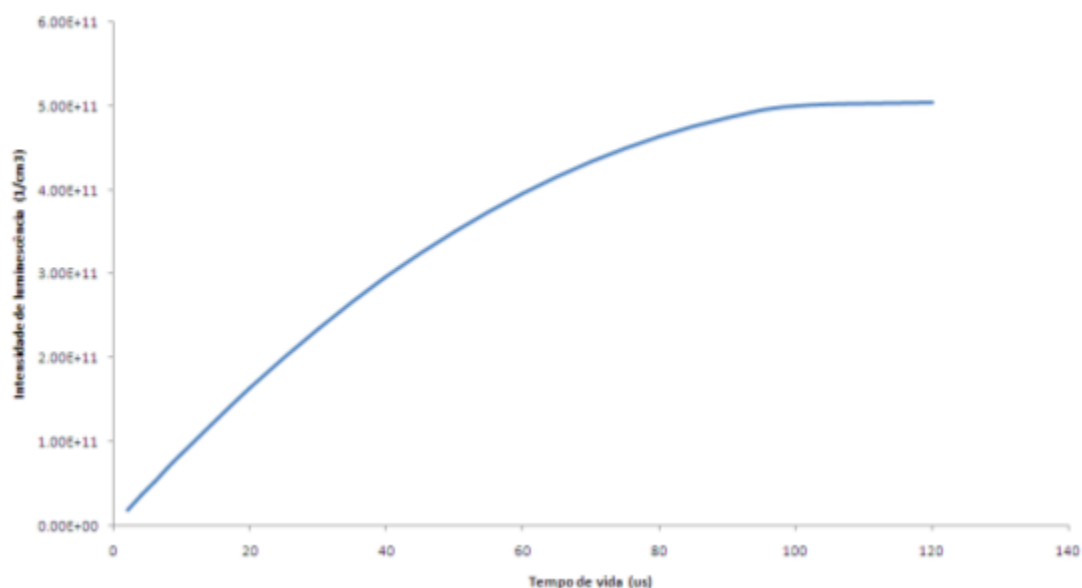


Figura 46 - Tempo de vida em função da intensidade de emissão de fótons, perfil através de um *fitting* feito com os dados adquiridos dos perfis de emissão de PL.

Na Figura 46 podemos visualizar o perfil geral da relação entre tempo de vida e o perfil de emissão de uma amostra de silício. Embora nos nossos perfis de emissão se tenha simulado tempos de vida na ordem dos $1000\mu\text{s}$, na elaboração da curva dos tempos de vida, achou-se que não seria necessário dado que não é um valor realista para a tecnologia actual de PV.

Esta curva permite-nos assim relacionar directamente valores de intensidade de luminescência através da seguinte relação polinomial.

$$I = -4 \times 10^7 \cdot \tau^2 + 9 \times 10^9 \tau \quad (\text{XXXV})$$

Sendo I a intensidade de luminescência e τ o tempo de vida absoluto (*bulk*) da amostra a analisar, permitindo assim elaborar um sistema rápido e eficaz de leitura de tempos de vida em amostras de silício através da técnica de fotoluminescência.

1.3.7.2 Eletroluminescência, EL,

Como já referido, a técnica de eletroluminescência baseia-se na excitação de um semicondutor por meio de uma diferença de potencial. A aplicação de uma diferença de potencial aos terminais metálicos de uma célula solar de silício, mais especificamente nas camadas base e emissora, leva à injeção de um excesso de portadores na junção $p-n$ (Método Estacionário SS). Assumindo que a espessura da camada emissora da célula (tipo- n) possui uma espessura negligenciável em comparação à da camada base (tipo- p), a injeção de electrões só será contabilizada na camada de base.

Resumidamente, esta técnica recria o funcionamento de uma célula fotovoltaica mas do modo inverso, em que a energia é injectada na célula e ela emite luz.

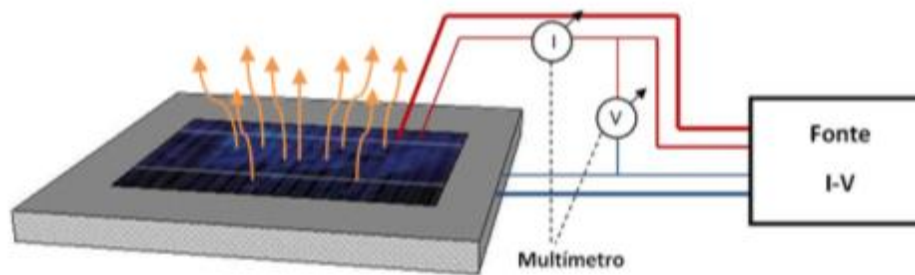


Figura 47 - Esquema de funcionamento da técnica de eletroluminescência.

Todo o sistema matemático por trás do cálculo dos perfis de distribuição dos portadores, do perfil de emissão do silício e até mesmo o perfil de relação entre a intensidade de emissão e o tempo vida, são equivalentes aos elaborados no capítulo de Fotoluminescência. O único factor que não se assemelha ao de fotoluminescência, são as condições de injeção de portadores em excesso. Na fotoluminescência tal como se pode verificar no capítulo anterior, a injeção é feita pelo fluxo de fotões incidentes na superfície da amostra, no caso da eletroluminescência a injeção como já foi referido é feita directamente nos contactos metálicos estimulados por uma fonte de tensão. Para o calculo do numero de portadores em excesso que se injectou na amostra, recorreu-se á seguinte expressão[27].

$$n_e 0 = \frac{n_i^2}{N_A} \cdot e^{\frac{q \cdot V_{apl}}{kT}} \quad (\text{XXXVI})$$

onde se considera uma tensão aplicada V_{apl} , q a carga do electrão k a constante de Boltzman e T a temperatura em Kelvins (300K).Tendo em conta que a tensão aplicada era de 0.9V, obteve-se o seguinte valor de portadores injectados nos contactos:

$$n_e 0 = 1.33 \times 10^{15} \text{ e/cm}^3$$

Esta expressão é aplicada directamente na XXIV, obtendo-se um perfil de distribuição em tudo idêntico ao gerado na fotoluminescência.

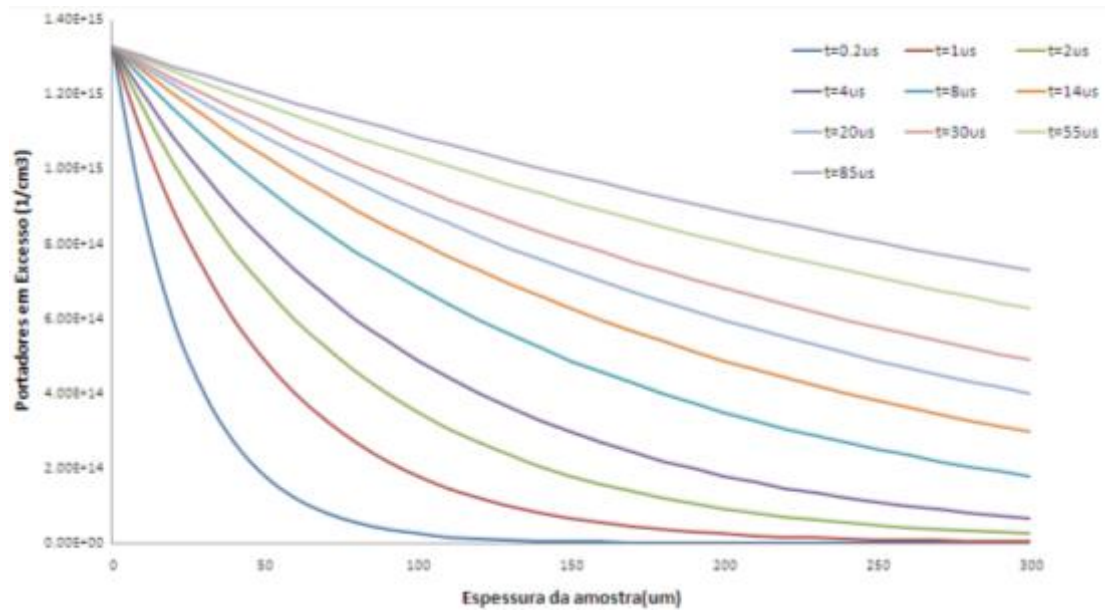


Figura 48 - Perfil de distribuição de portadores minoritários ao longo da espessura da amostra, variando o tempo de vida de 0.2us a 85us (eletroluminescência)

Aplicando uma variação de tempo de vida idêntica á do método de PL, e conjugando a contribuição da geração espontânea de cada portador, obtemos o perfil de emissão de uma amostra de silício gerado por eletroluminescência.

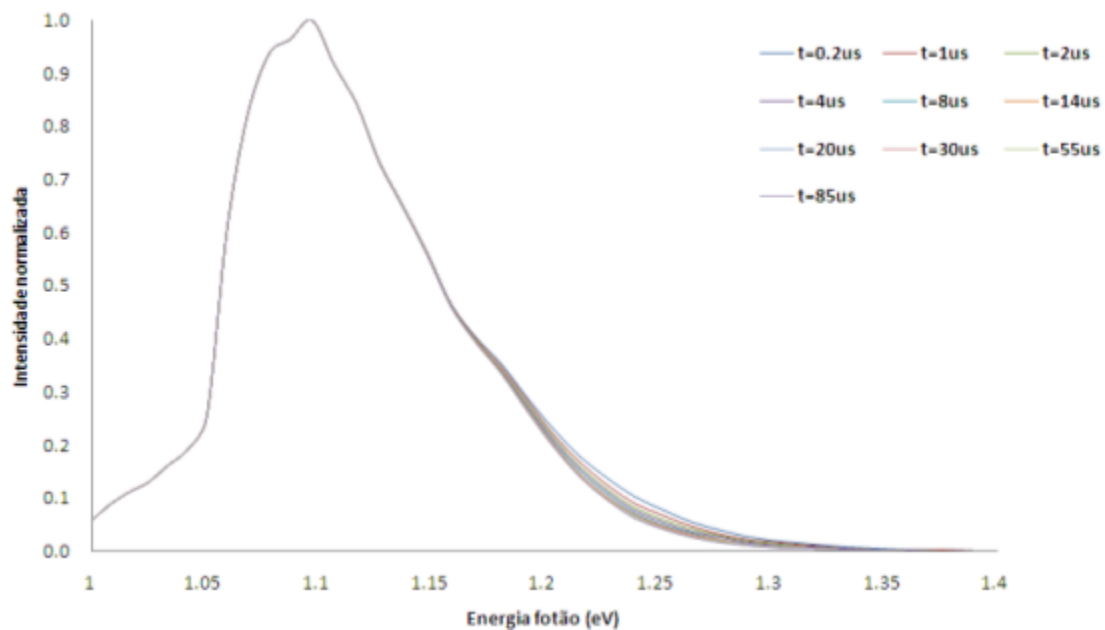


Figura 49 - Perfis normalizados da emissão por eletroluminescência com variação do tempo de vida dos portadores.

Na fotoluminescência, na análise da emissão de fótons no interior da amostra, assumiu-se que não ocorria reflexão na superfície traseira dado que se estava a trabalhar com uma *wafer* que não possuía nenhum contacto metálico que revestisse essa superfície. Na eletroluminescência tal não se passa, é necessário contabilizar a reflexão na superfície traseira como sendo total. Ficando a equação final do perfil de emissão para o exterior dada por;

$$\frac{dj_{\gamma,em}}{d(\hbar\omega)} = 1 - R_f \cdot \int_0^d j_{\gamma,em} \cdot e^{-\alpha \cdot x} + R_t \cdot e^{-\alpha \cdot (2d-x)} \cdot dx \quad (XXXVII)$$

Assumindo que $R_f = 0$, e que $R_t = 1$ obtemos

$$\frac{dj_{\gamma,em}}{d(\hbar\omega)} = \int_0^d j_{\gamma,em} \cdot e^{-\alpha \cdot x} + e^{-\alpha \cdot (2d-x)} \cdot dx \quad (XXXVIII)$$

Tal como o já explicado na técnica de fotoluminescência é necessário contabilizar além do percurso óptico desde a superfície emissora até ao fotodetector, é necessário entrar em conta com a eficiência quântica da camera, ficando o perfil detectado pela camera

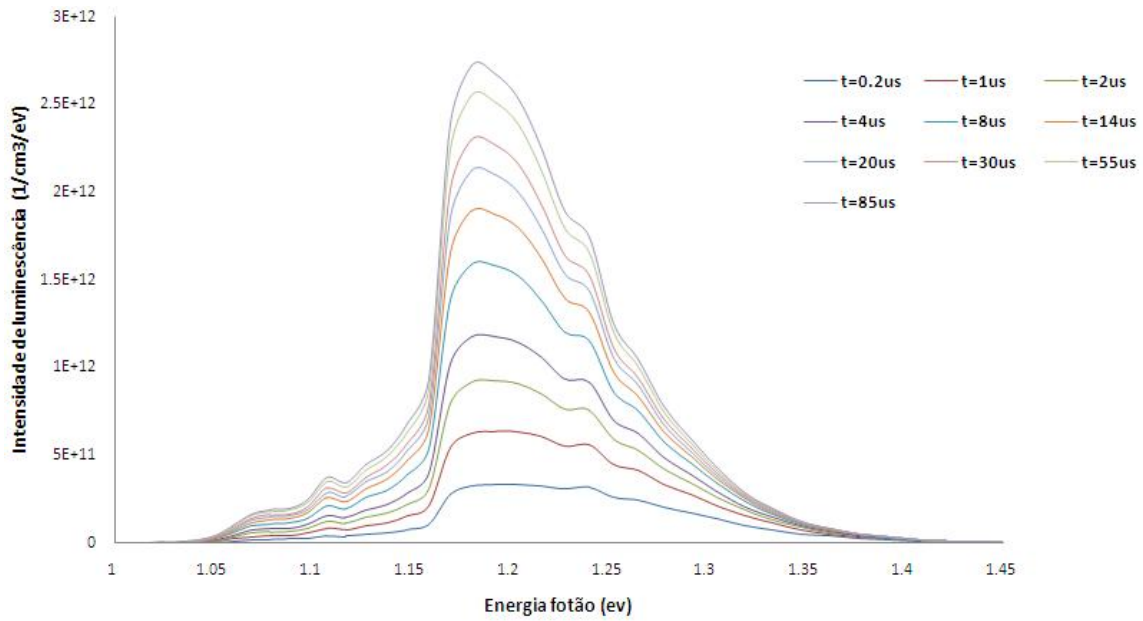


Figura 50 - Perfis normalizados de emissão por eletroluminescência, depois de ponderado com a eficiência quântica da camera.

Após a elaboração dos perfis teóricos detectados tanto na técnica de EL como de PL, podemos fazer a integração destes perfis para diferentes tempos de vida, para assim se obter uma conversão de intensidade de emissão de fótons para tempo de vida da amostra.

Após essa integração, obteve-se os seguintes perfis e as suas respectivas equações

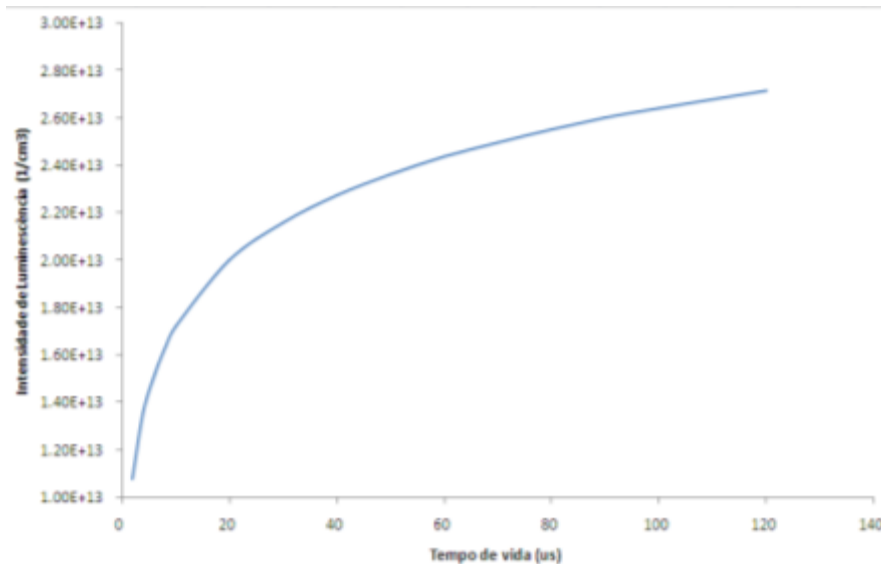


Figura 51 - Tempo de vida em função da intensidade de emissão de fótons, perfil através de um *fitting* feito com os dados adquiridos dos perfis de emissão de EL

Como se pode verificar, tanto o perfil obtido em PL como para EL da relação da intensidade de luminescência com o tempo de vida absoluto, são idênticos em forma variando somente em amplitude.

Este perfil permite-nos entretanto criar uma equação que relacione directamente a intensidade de luminescência com os tempos de vida, tal e qual como na vertente de PL. Sendo a equação do tipo:

$$I = 4 \times 10^{12} \cdot \ln \tau + 8 \times 10^{12}$$

Tal como referido no capítulo da Fotoluminescência, esta relação vai permitir elaborar um sistema rápido de conversão de intensidade de luminescência em tempos de vida.

Ao contrário da técnica de Fotoluminescência onde se aprofundou o método de obtenção de tempos de vida em função da intensidade de luminescência, na técnica de Electroluminescência não se foi além da dedução teórica aqui demonstrada, ficando para trabalho futuro um aprofundar desta técnica.

2. Sistema Experimental

No desenvolvimento desta dissertação, criou-se uma estrutura capaz de reproduzir as técnicas de fotoluminescência e de eletroluminescência. Toda a logística foi criada de raiz, e tanto o hardware de PL como o de EL encontram-se agregados num único sistema.

Para melhor conhecer o que já tinha sido elaborado na comunidade científica sobre estas técnicas, investigou-se uma série de autores de referência na área, tendo sido possível obter um conjunto de visões diferentes sobre o melhor método de obter a luminescência. O ponto mais importante e que gerava maior controvérsia, era a posição da fonte de iluminação que iria excitar a nossa amostra, se iríamos optar por uma excitação directa na superfície onde se iria obter a luminescência, ou se iríamos para uma montagem na qual a iluminação iria incidir na superfície contrária à superfície de medição. Na Figura 52 é possível visualizar a metodologia mais utilizada na comunidade científica[14], [17], [24], [29][30][31]

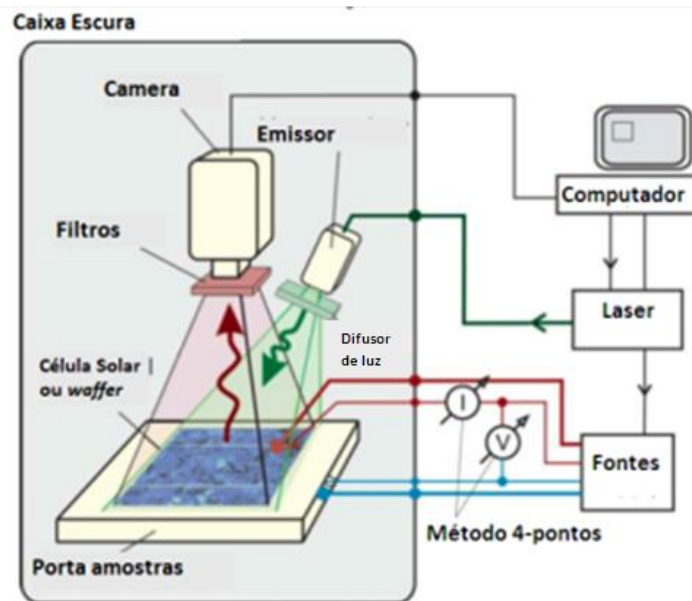


Figura 52 - Sistema Experimental de Foto e Eletroluminescência. Sendo a superfície de emissão e a de excitação a mesma[24]

Apesar da abordagem mais utilizada ser a indicada na Figura 52, optou-se por ir numa outra direcção. Na metodologia mais abordada, tal como já referido, a injeção dos portadores minoritários na amostra é feita directamente na superfície detectora de luminescência. Apesar de ser o método mais utilizado na comunidade científica, deparamo-nos com o receio de que os filtros da camera CCD que se encontram em constante exposição á radiação vinda do laser, após captarem muita radiação vinda do laser, dessem inicio á emissão de radiação eles próprios[31]. Os filtros utilizados na logística da Figura 52 são filtros muito complexos e baseiam-se a sua filtragem na absorção da radiação, e tal como vem da Lei da Conservação da Energia, essa radiação absorvida tem de ser libertada de algum modo. Tal como se verifica de seguida

$$\alpha - R + \tau = 0 \quad (\text{XXXIX})$$

Uma vez que a função dos filtros é a de não transmitir a radiação proveniente do laser para a camera, logo $\tau = 0$, e como também não é do nosso interesse que a radiação laser se reflecta no filtro e retorne á amostra, logo $R = 0$. Assumimos então que a radiação proveniente do laser é absorvida pelo filtro, resta que seja transmitida ou emitida, ou seja que o filtro emita radiação

$$\alpha = \varepsilon + \tau \quad (\text{XL})$$

Mas tal como referido, $\tau = 0$, obtemos que:

$$\alpha = \varepsilon$$

Dado que não é do nosso interesse que a luminescência detectada pela camera seja proveniente da radiação laser, adquiriu-se um conjunto de filtros ópticos que filtrasse toda a radiação proveniente do laser permitindo assim obter imagens mais precisas da nossa amostra. Mas tal como referido sobre a situação em que os filtros iriam estar em constante exposição á radiação laser, e apesar de os filtros adquiridos bloquearem a radiação laser, existe sempre o risco associado, e por isso optou-se por outro método.

De maneira a expor o filtro somente á radiação necessária para a aquisição de dados e ao mínimo possível a camera e o filtro, optou-se por colocar a fonte a incidir sobre a radiação na superfície contrária à de detecção, otimizando assim a excitação dos portadores e diminuindo a exposição da camera e do filtro á radiação laser. O esquema deste sistema encontra-se exposto de seguida na Figura 53.

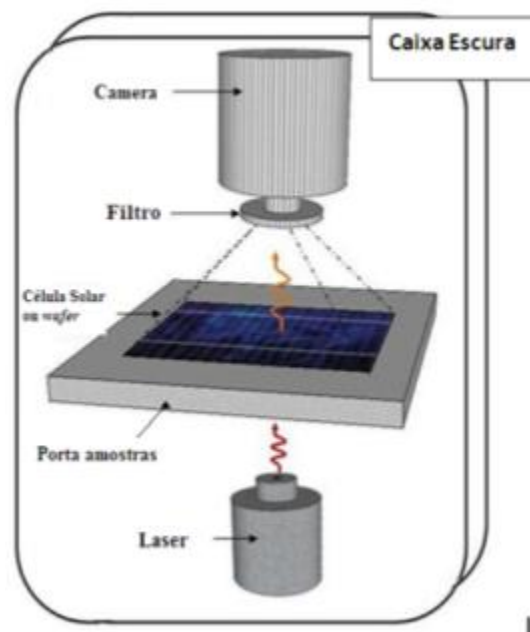


Figura 53 - Sistema Experimental de Fotoluminescência; excitação da amostra feita na superfície oposta á de medição de luminescência.

A Figura 53 expõe outro método de iluminação da amostra, na qual o problema do sistema anterior já não existe dado que toda a radiação que chega á câmara é proveniente da amostra e não do laser. No entanto este tipo de sistema também invoca uma logística mais elaborada, especialmente no isolamento da área que circunda a amostra que é irradiada, dado que é crucial que não exista nenhuma radiação proveniente do laser a atravessar a amostra e chegue à câmara. Apesar de esta ser de maior complexidade na montagem do equipamento, decidiu-se avançar com a estrutura e até ao momento foi a utilizada na elaboração desta dissertação.

Após a dúvida quanto á abordagem seleccionada para a metodologia de excitação da amostra, finalmente foi possível construir todo o sistema e dar inicio aos testes e análises práticas.

Na Figura 54 podemos visualizar a bancada de trabalho e todo o equipamento envolvido nestas duas técnicas.

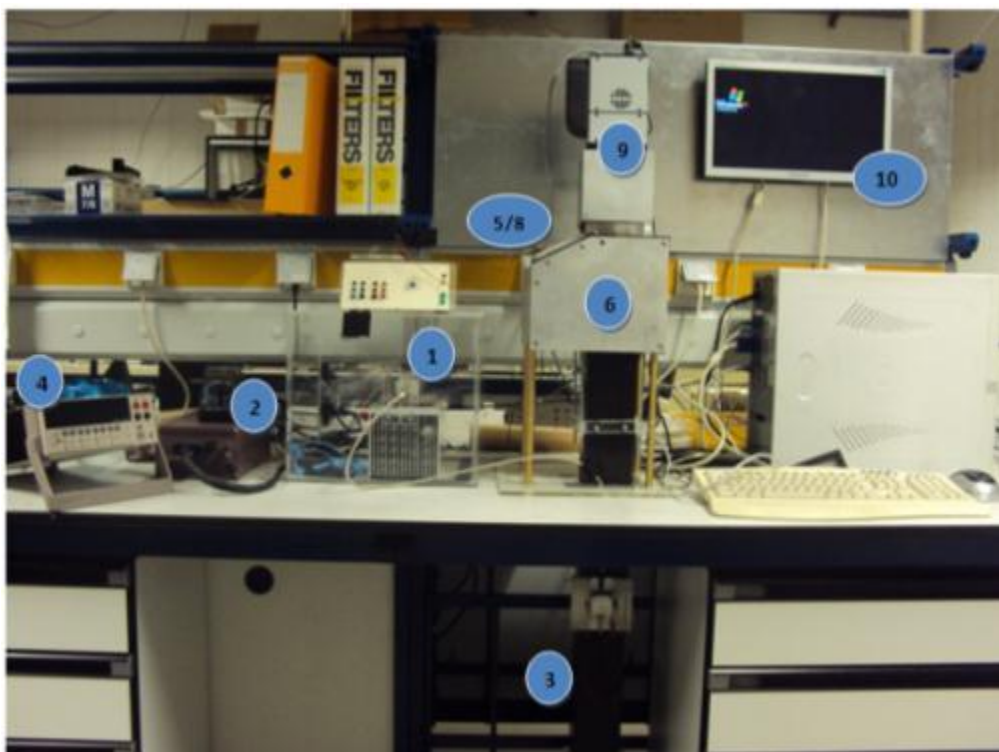


Figura 54 - Bancada de trabalho do sistema PL e EL.

Fotoluminescência:

1. Laser (QPC)
2. Fonte de Alimentação do Laser
3. Tubo de Luz

Eletroluminescência:

4. Fonte Corrente/Tensão
5. Contactos metálicos

Estrutura Partilhada

6. Caixa estanque
7. Porta amostras
8. LED – iluminação externa
9. Camera CCD
10. Software

2.1 Estrutura Fotoluminescência

Na Figura 55 é possível visualizar com maior pormenor que equipamentos foram utilizados para a técnica de PL.

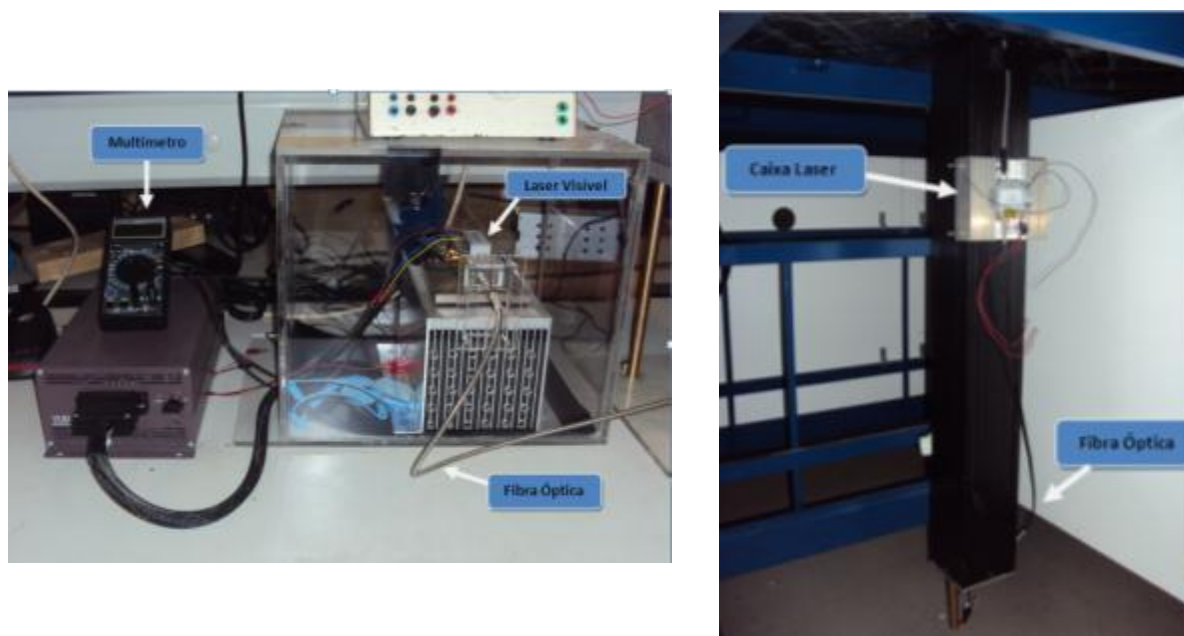


Figura 55 - a) Lasers e respectiva fonte de energia; b) tubo de luz responsável pela transmissão da radiação do laser para a amostra.

Na Figura 55 a) podemos visualizar o equipamento responsável pela emissão do feixe laser, em conjunto podemos também ver a existência de um multímetro que se encontra ligado ao termo-par (*peltier*) que regula a temperatura do laser, dando assim a possibilidade de se controlar a temperatura de operação do laser através da conversão resistência - temperatura que o fabricante forneceu (Anexo IV). Encontra-se também assinalado o laser visível que se adquiriu em conjunto com o laser de diodo, e a fibra óptica responsável pela transmissão do laser até ao tubo de luz que se encontra exposto na b), onde também se pode visualizar a caixa laser que é basicamente uma junção de dois tipos distintos de fibras. A razão para a instalação desta caixa de junção baseou-se numa avaliação de risco na utilização do equipamento, dado que, a fibra de ligação á fonte laser ser muito sensível, optou-se por este sistema para que em caso de acidente com a fibra, a fibra em risco não fosse a de origem mas sim outra fibra mais robusta.

2.1.1 Fonte de Iluminação

Como já referido anteriormente a fotoluminescência é alcançada através da iluminação de uma amostra através de uma fonte de luz externa. Para tal optou-se por um diodo laser capaz de emitir um feixe de fótons com energias acima do hiato do silício, e que apresentasse uma homogeneidade e consistência na radiação emitida sobre as amostras, para tal foi necessário adquirir comercialmente um laser com as características que pretendemos, um laser visível que sirva como guia e uma fonte de alimentação capaz de alimentar com toda a segurança estes dois lasers.

2.1.1.1 Laser

Na escolha do nosso laser, e após uma cuidadosa prospecção do mercado, optou-se pela empresa **Laser Operations LLC**, produtora da linha de produtos Lasers QPC (Quintessence Photonics Corporation), e uma referência em lasers de diodo de alta performance.

De entre o leque de opções que a empresa nos colocou, a opção de aquisição decaiu sobre a gama de laser de diodo, *Brightlock*.

Mais concretamente, e tendo em conta os níveis de energia que eram pretendidos atingir, definiu-se como valor de referência os 800nm de comprimento de onda do nosso laser, ou seja, cerca de, 1,55eV, sendo portanto mais energético que a hiato do silício (1,2eV). Dentro da gama *BrightLock*, optou-se pelo modelo *BrightLock Ultra 50_6108-0000* (Anexo V).

Tabela 4 - Principais parâmetros do Laser

BrightLock Ultra 50	6108-0000
Potência de Saída	$\geq 30W$
Corrente de Operação	$< 44A$
Tensão de Operação	$< 2V$
Comprimento de Onda médio	808,5nm

Tendo em conta que o $\lambda(\text{nm})$ do laser é de 808,5nm, o equivalente em unidades eV é de $\approx 1,53\text{eV}$, sendo portanto os fótons emitidos pelo laser mais energéticos que a hiato do silício das nossas amostras, tornando-se assim numa escolha viável para o nosso estudo.

Na aquisição do laser, o fabricante alertou de imediato para os padrões de segurança, e as rotinas de segurança a fazer antes, durante e depois da utilização do equipamento. Os lasers podem ser divididos em classes de acordo com os riscos à segurança durante a sua utilização, tais como:

Classe I: Não possui nenhum risco conhecido associado à saúde do utilizador, devido à sua potência muito baixa ou à eficiência das protecções. Ex: Laser das impressoras.

Classe II: Potências até 1miliwatt, não implicam riscos, uma vez que a resposta do olho (reflexo) ao laser é rápida o suficiente ($\sim 1/4\text{s}$) para proteger o olho de radiação nociva. Ex: Laser indicadores, scanners laser de leitura de código de barras.

Classe III-a: Potência de 1 a 5 miliwatts. Implica riscos de variados riscos:

- Cegueira pontual
- Lesões variadas a nível dos olhos
- Não são conhecidos danos na pele
- Não existe risco imediato de incêndio

Lasers de HeNe de baixa potência são exemplos de lasers nesta classe.

Classe III-b: Potência de 5-500miliwatts. Laser de risco elevado.

- Radiação directa leva a danos definitivos na vista
- Potências altas, leva a queimadura na pele e risco elevado de incêndio.

Classe IV: Potência superior a 500 miliwatts. Risco muito elevado.

- Danos na visão, mesmo sendo radiação difusa
- Queimadura na pele
- Risco elevado de incêndio, tanto em materiais como em vestuário.
- Radiação difusa considerada tão perigosa como a radiação directa.

O laser adquirido enquadra-se na Classe IV.

De maneira a promover uma maior segurança ao utilizador, nos momentos em que o laser se encontra a funcionar, adquiriu-se um kit de óculos protectores. Os modelos adquiridos pertencem á **Thorlabs**, e são da gama LG9 de cor âmbar. A nossa maior preocupação na escolha de uns óculos de protecção contra o feixe laser, para tal teve se em atenção á densidade óptica do laser para diferentes comprimentos de onda, especialmente ao comprimento de onda do laser (808nm) (Anexo VI).

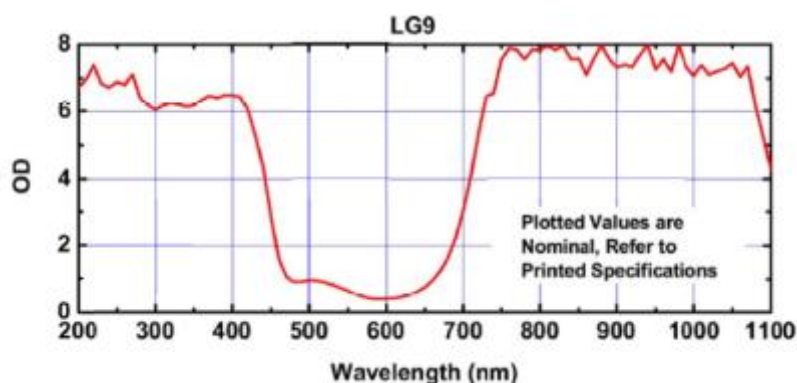


Figura 56 - Densidade Óptica dos óculos de protecção da Thorlabs(Anexo VI).

Laser visível

A aquisição de um laser que trabalha-se na gama da radiação visível ($390 < \lambda < 780$) veio a revelar-se uma boa aquisição, dado que permitiu vir a ser utilizado como laser guia no momento de direccionar o laser dentro do tubo de luz.

Controlo Laser

Na aquisição do equipamento laser, foi facultado junto do mesmo o *software* de controlo do laser. Na Figura 57 é possível visualizar a interface do *software* de controlo.

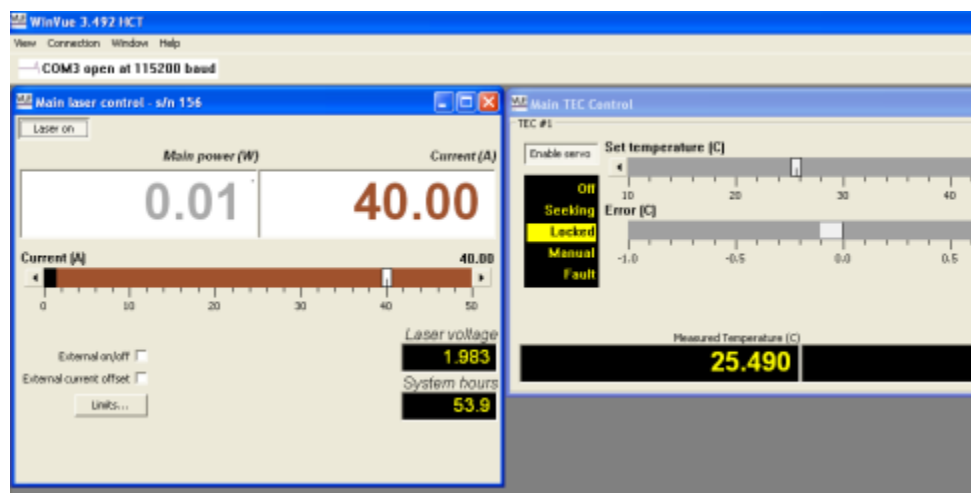


Figura 57 - Interface do software de controlo do laser, e do controlo de temperatura do módulo

Como se verifica pela legenda da imagem do sistema de controlo do laser, temos duas interfaces, uma correspondente á intensidade do laser, e a segunda corresponde ao controlo de segurança da temperatura do sistema laser.

Na interface de controlo, é possível verificar uma escala de controlo da intensidade, que vai desde os 0 A até aos 50A que correspondem ao máximo que o laser atinge (~30W).

Na interface de temperatura, verificamos que é possível seleccionar uma temperatura guia ao termo-par (*peltier*) que regula a temperatura do laser (*set temperature*). Caso ocorra um sobreaquecimento do laser que ultrapasse as margens que delimitamos, o sistema por segurança automaticamente desliga o laser prevenindo assim danos no equipamento. A interface de controlo de temperatura foi validada através da utilização do multímetro da Figura 55 a) e da equação de Steinhart-Hart do Anexo IV.

2.1.1.2 Fonte de alimentação

Além dos dois lasers adquiridos, foi necessário também junto da mesma empresa adquirir uma fonte de alimentação capaz de sustentar o funcionamento dos dois lasers. Na página de apresentação do modelo BrightLock Ultra 50 (Figura 55.a), estava referenciada uma fonte específica para aquele modelo e que era também capaz de suportar a carga (mínima) que o funcionamento do laser visível implica para a fonte.

O modelo que nos foi proposto foi o modelo número, 9001-0002. No Anexo VII, é possível ver mais ao pormenor as características da fonte.

2.1.2 Tubo de Luz

A criação de uma estrutura tubular que liga a fonte laser à amostra, foi alvo de uma análise e dimensionamento prévio à sua construção. Era nossa intenção que a radiação que incidisse sobre a amostra fosse a mais homogênea possível de maneira a obter uma excitação igual em todos os pontos da sua superfície, para tal utilizou-se um software de sistemas ópticos, ZEMAX. O estudo e dimensionamento feito em ZEMAX, encontra-se descrito no capítulo (Divergência e Homogeneidade da iluminação). Foi escolhido o acrílico como material a utilizar no nosso tubo, barato e robusto, pareceu do nosso interesse a sua utilização. O tubo foi revestido na superfície exterior por fita adesiva preta, de maneira a impedir a transmissão de luz parasita (iluminação exterior) para dentro do tubo e assim prejudicar a nossa análise. A superfície interna do tubo também foi revestida com uma película espelhada para promover o fenómeno de reflexão dentro do tubo. As medidas encontram-se descritas na .

Tabela 5 - Dimensões do tubo de luz.

Comprimento	Largura (interna)	Espessura
1m	0.07m	0.01m

2.2 Estrutura Eletroluminescência

Na Figura 58 podemos visualizar com maior detalhe a estrutura utilizada na técnica de EL.

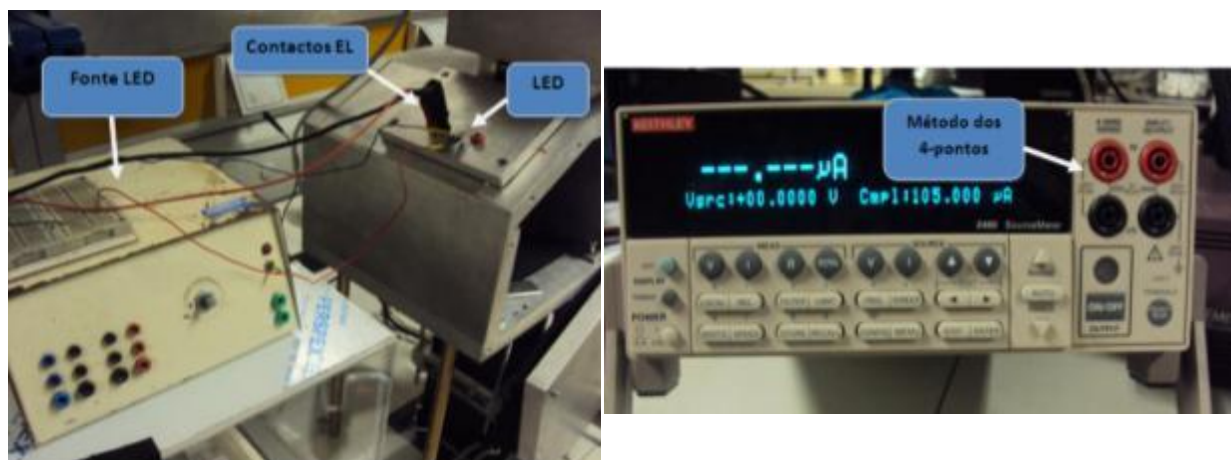


Figura 58 - a) Equipamento EL, LED de iluminação externa visível e contactos EL; b) Fonte corrente-tensão de EL.

2.2.1 Fonte de Corrente/Tensão

Para a geração de uma diferença de potencial entre os terminais de uma célula fotovoltaica, utilizou-se uma fonte de corrente/tensão já existente no laboratório (Figura 58.b), sendo por isso desnecessário adquirir equipamento novo. De salientar que a fonte, estava adaptada para o método dos 4-pontos, permitindo funcionar tanto como fonte corrente/tensão e como voltímetro e amperímetro.

2.2.2 Contactos metálicos

Para a transmissão da energia da fonte aos contactos da célula, foi necessário criar um mecanismo que tornasse possível essa transmissão sem que se criasse situações de curto-circuito com a caixa de armazenamento das amostras, uma vez que a mesma era feita de alumínio. Mais á frente no subcapítulo do porta amostras, veremos com maior detalhe os contactos.

2.3 Estrutura Partilhada

Uma das mais-valias destas duas técnicas, é o facto de as duas poderem partilhar grande parte da sua estrutura, dado que a única nuance que as distingue ser o método de fornecer energia á célula.

2.3.1 Caixa Estanque

Esta parte da nossa estrutura, é claramente uma das mais cruciais e importantes do nosso sistema experimental. É neste local onde ocorre a excitação das amostras e onde a camera irá detectar a luminescência gerada pela amostra, e por essa mesma razão é muito importante que se consiga reproduzir um ambiente o mais estanque possível. A estanquicidade deste sistema é relevante tanto para a segurança do utilizador como para a qualidade das análises, dado que uma estanquicidade quase perfeita irá prevenir a fuga de radiação laser como a entrada de radiação parasita (luz ambiente). A criação de uma estrutura de raiz, que seja capaz de manter a área de estudo completamente “às escuras”, foi possível com o auxílio da oficina da FCUL.

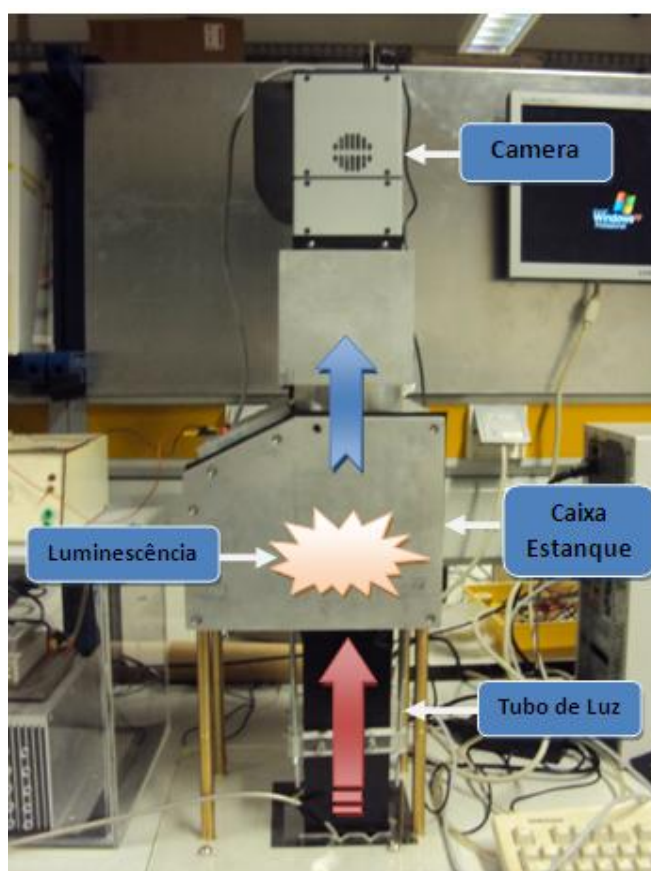


Figura 59 - Caixa estanque inserida no sistema de PL. Entrada da radiação laser na caixa estanque, ocorrência de luminescência e posterior detecção pela camera.

A caixa foi elaborada toda em alumínio e podem ver o seu desenho junto com as dimensões no Anexo VIII.

2.3.2 Porta amostra

A ligação entre o tubo de luz que transmite a radiação laser e a nossa amostra, tem de ser uma região o mais estanque possível, ou seja, que impeça que qualquer radiação exterior (iluminação ambiente) entre no sistema, impedindo também fugas de radiação laser para dentro da caixa interferindo nas medições.

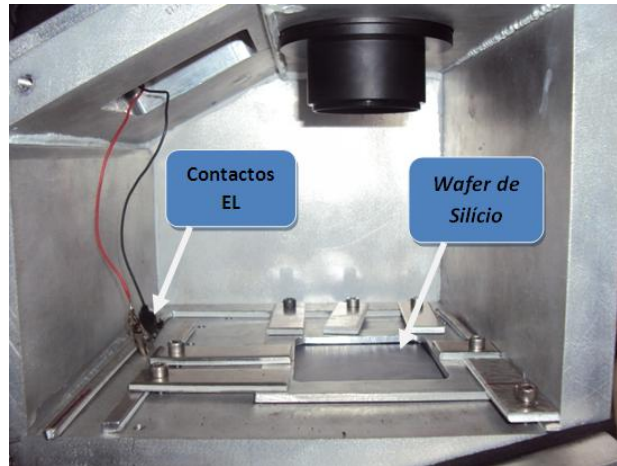


Figura 60 - Interior da caixa estanque com uma *wafer* de silício inserida no porta amostra.

O sistema adoptado para porta amostra foi um sistema de compressão. Desenvolveu-se um par de molduras de alumínio e de borracha esponjosa preta disponível no laboratório, e a sua sobreposição sobre pressão no topo da amostra que se encontra na base da caixa estanque, iria resultar num bloqueio da radiação parasita que poderia vir a entra/sair pelas bordas da amostra. Esperando assim vir a obter um sistema de porta amostras o mais estanque possível para o decorrer das nossas experiências. Para validar este sistema, procedeu-se a um teste de detecção de luz parasita que mais tarde será abordado.

2.3.3 LED – Iluminação Externa

Light Emitting Diodes (LEDs) são junções *p-n* que conseguem emitir radiação espontânea na gama do ultravioleta, visível, ou nas regiões do infravermelho. O sistema de LED visível é o que possui uma maior gama de aplicações no ramo da electrónica, e no nosso sistema experimental iremos utilizar um LED de cor vermelha para iluminar o interior da nossa caixa estanque.

A utilização de um LED para iluminação do interior da nossa caixa foi um pormenor não planeado, mas que acabou por ir em frente. O interesse em ter esta iluminação no interior da caixa, é o facto de nos permitir verificar se a nossa amostra está bem colocada no porta amostra, e se os contactos metálicos da EL não se soltaram. Para fornecer energia ao LED, utilizou-se uma fonte comum no laboratório capaz de fornecer até 12V, e elaborou-se um circuito simples capaz de fornecer energia ao LED. A Figura 58 a), ilustra a sistema montado para o LED.

2.3.4 Fotodetector - Camera CCD

Fotodetectores são dispositivos semicondutores capazes de converter sinais ópticos em sinais eléctricos. A operação de um fotodetector envolve três etapas:

1. Geração de Portadores por uma radiação incidente
2. Transporte/multiplicação dos portadores por um mecanismo qualquer de ganho de corrente.
3. Interação da corrente com o circuito externo para providenciar o sinal de saída.

Neste projecto o fotodetector escolhido foi uma camera digital de Si-CCD (*Silicon-Charge Coupled Device*) da empresa **Sensovation**, especialista em tecnologia de luminescência e em detecção de luz por cameras CCD.

A gama seleccionada para este projecto foi a **CoolSamBa**, que é um equipamento especialmente desenhado para aplicações em detecção de luminescência de baixa intensidade. Esta gama encontra-se totalmente equipada com sensores de Si-CCD de alta resolução e sensibilidade, 16-bit ADCs e um sistema de 4 fases de arrefecimento termoeléctrico de *Peltier*. Estas cameras são capazes de fornecer imagens com elevado rácio sinal-ruído em aplicações tais como a caracterização de células solar por luminescência, revelando-se por isso as ideias para o nosso projecto.

- Geração de imagens por Eletroluminescência e Fotoluminescência
- Detecção de micro-fendas, *fingers* desconectados e zonas de baixa eficiência.
- Vantagens técnicas da gama para projecto;
- Sensores personalizáveis aos nossos interesses,
- Boa sensibilidade na gama próxima dos IR (1000 – 1100nm),
- Elevada resolução espacial,
- Arrefecimento de 4 fases TE – *Peltier* (imagens de baixo ruído),
- Comprovado em técnicas de luminescência para a produção de células,
- Economicamente rentável.

Analizados os equipamentos que eram oferecidos pela *Sensovation*, optou-se pelo modelo **coolSamba HR-320**, tendo em conta o fabricante era o modelo mais capaz para caracterizações de células solares e módulos. O balanço combinado entre a sensibilidade, resolução espacial e leitura rápida de imagem, permite uma velocidade de 1 imagem por segundo, incluindo o tempo de integração da imagem e a sua leitura pelo PC. A Tabela 6 revela algumas das características deste modelo, no é possível obter a sua ficha técnica para uma análise mais detalhada.

Tabela 6 - Tabela com os parâmetros mais importantes da camera Si-CCD.

Especificações	coolSamBa HR-320
Tipo de Sensor	Kodak KAF Full Frame Si-CCD
Resolução Pixel (activa)	3.2 Mega Pixel (2184 x 1472)
Saturação do pixel	55000 e ⁻ (sem <i>binning</i>) 110000 e ⁻ (2x2 <i>binning</i>)
Dimensão do pixel	6,8µm x 6,8µm
Eficiência Quântica Máxima	90%

Na aquisição do equipamento (camera) veio também incluído o software de tratamento das imagens adquiridas no processo.

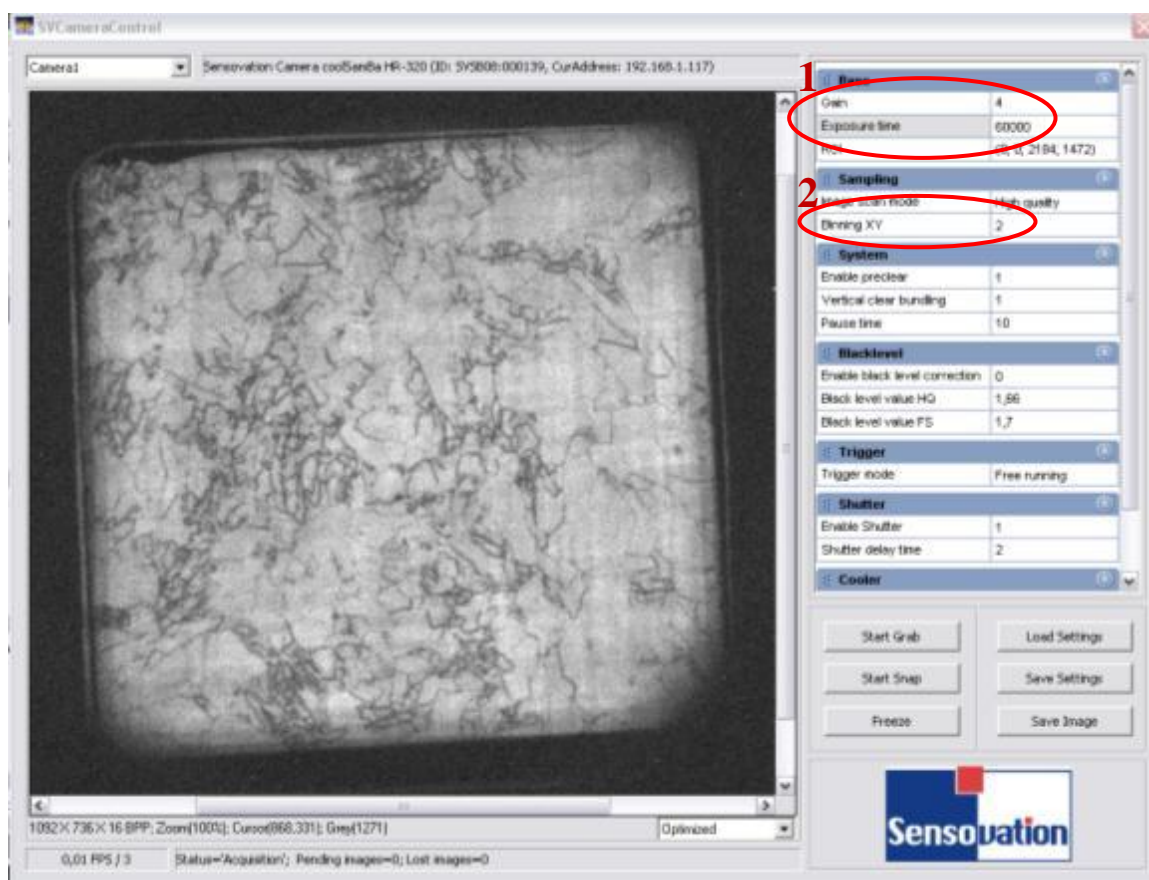


Figura 61 – Interface de controlo da camera CCD. Fotoluminescência efectuada numa amostra de silício multicristalino.

Na Figura 61 é possível visualizar a interface do software da camera CCD, e analisar toda a base de controlo da aquisição de imagens. Do lado direito da interface existe uma coluna onde podemos controlar e alterar os parâmetros de aquisição de dados da luminescência, tais como, o Ganho que a camera aplica à luminescência que capta, o tempo de aquisição, o *binning* aplicado às imagens, a qualidade da imagem e até a correcção do nível de preto dos dados.

Durante a utilização deste software, foi dada mais atenção aos parâmetros que afectavam de uma maneira quantitativa os valores de luminescência, tais como:

1. O Ganho aplicado no sistema e o tempo de exposição à luminescência.
2. *Binning* aplicado ao nível dos pixéis da imagem.

Estes parâmetros são explorados com maior ênfase mais adiante neste documento.

Os outros parâmetros deste software, apesar de não serem tão cruciais para as análises feitas como os descritos acima, podem levar á optimização futura de todo este sistema e merecem um estudo mais aprofundado.

3. Testes de Optimização

3.1 Divergência e Homogeneidade da iluminação

Como já foi dito anteriormente, a técnica de fotoluminescência requer que as nossas amostras sejam excitadas por uma fonte de iluminação exterior ao nosso sistema, de maneira a poder ocorrer o fenómeno de recombinação radiativa e gerar luminescência. O que é de enorme importância para que a análise seja a mais precisa possível, é que a excitação seja feita de um modo contínuo e homogêneo sobre toda a amostra a analisar (método estacionário).

Ao emitirmos radiação sobre a nossa amostra de um modo contínuo e homogêneo, conseguimos obter uma leitura realista da luminescência proveniente da amostra que iremos analisar, melhorando consideravelmente a qualidade da informação recolhida.

Para se conseguir uma excitação homogênea e continua da nossa amostra, elaborou-se um estudo com recurso ao software de simulação óptico – ZEMAX.

O ZEMAX é o software mais utilizado por engenheiros e designers de sistemas ópticos por todo o mundo. É utilizado geralmente em projectos em que é necessário seleccionar o melhor tipo de lente para um sistema óptico, simulação da propagação de luz difusa, e no nosso caso, na simulação da propagação de um feixe laser de maneira a obter uma exposição homogênea do laser na amostra a analisar

Com recurso ao software ZEMAX, e de acordo com as dimensões do alvo que se definiu anteriormente no capítulo da estrutura foi possível proceder á simulação e definir com mais certeza as dimensões do tubo de luz de modo a que se obtenha na amostra ma irradiância continua e homogênea sobre o alvo.

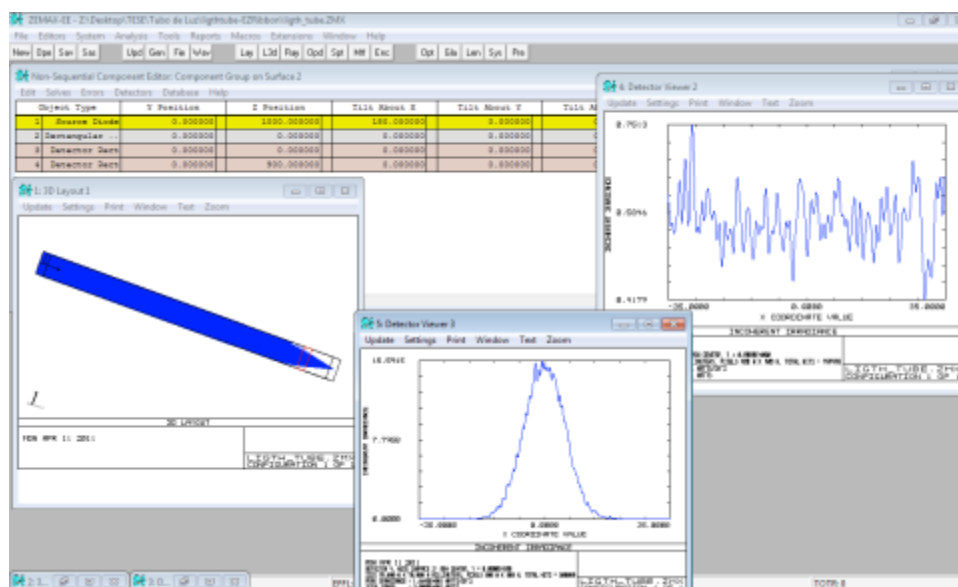


Figura 62 - Interface do software de simulação ZEMAX.

Para se dar inicio á simulação do sistema óptico, teve de se estudar o local onde se iria colocar a estrutura de todo o projecto, uma vez que o tubo de luz que irá guiar o feixe laser terá de ter algumas limitações quanto às suas dimensões. Além da estrutura, a dimensão típica das amostras que o nosso laboratório geralmente estuda e analisa, também irá influenciar o dimensionamento do tubo de luz, tanto a nível de largura como a nível de formato.

De acordo com a bancada onde a estrutura iria assentar, definiu-se como limite máximo de comprimento do tubo de luz, 1 metro. E na definição da largura do nosso tubo de luz, definiu-se 0,7 metro de diâmetro interno numa estrutura paralelepípedica.

De acordo com as limitações físicas impostas pelo local de instalação procedeu-se ao input dos dados necessários para dar início à simulação.

Tabela 7– a), b) e c): Tabelas de parâmetros físicos inseridos na simulação ZEMAX.

	Posicionamento (z;mm)	Potência (W)	Divergência -XY-	Feixes analisados
Fonte Laser	1000	30	6,5°	500000

	Material	Raio (X,Y;mm)	Comprimento (mm)	Formato
Tubo de Luz	Espelho	35	1000	Paralelepípedo

	Material	Raio (X,Y;mm)	Pixelização (X, Y)	Região de detecção (X, Y)
Detector (Alvo)	Absorvor	35	800x800	-90° (X, Y) 90°
Detector (Fonte)	Translúcido	35	800x800	-90° (X, Y) 90°

Na Tabela 7 podemos visualizar os parâmetros base que se utilizaram na simulação em ZEMAX, desde às características da fonte laser, das dimensões e formato do tubo de luz que transmite a radiação laser e dos detectores que nos permitem elaborar uma análise da simulação.

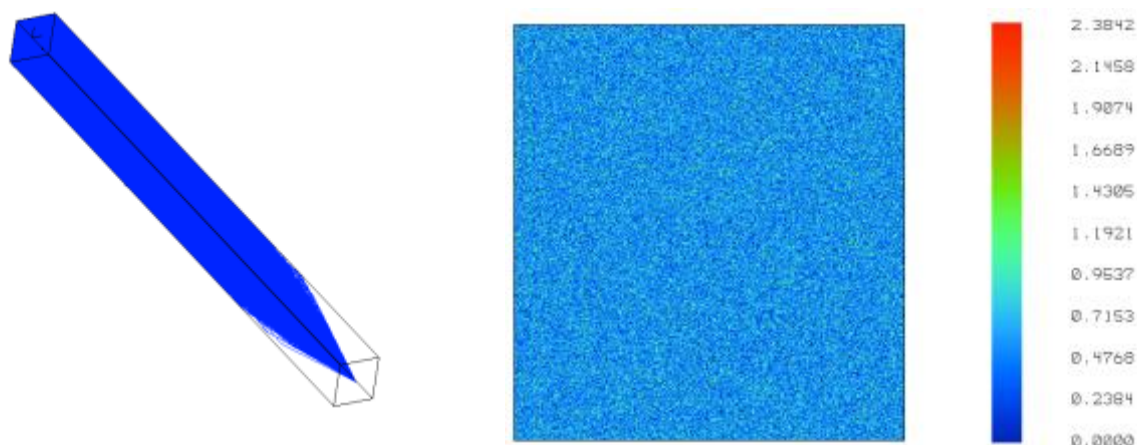


Figura 63 - Resultados extraídos dos detectores da simulação do ZEMAX. a) Esquema 3D do tubo de luz e a distribuição da radiação laser dentro do tubo; b) Distribuição espacial da irradiância na superfície do detector alvo.

Tendo em conta os resultados obtidos na simulação podemos concluir que os parâmetros impostos resultaram numa simulação de sucesso. Podemos verificar na Figura 63 b) que praticamente toda a irradiância se encontra na gama dos 0.6 W/cm^2 , o que vai de encontro do valor utilizado nas simulações feitas no PC1D. De maneira a ter certezas quanto á irradiância na superfície do detector, extraiu-se uma coluna de dados de maneira a obter um perfil que nos permitisse extrair um valor médio.

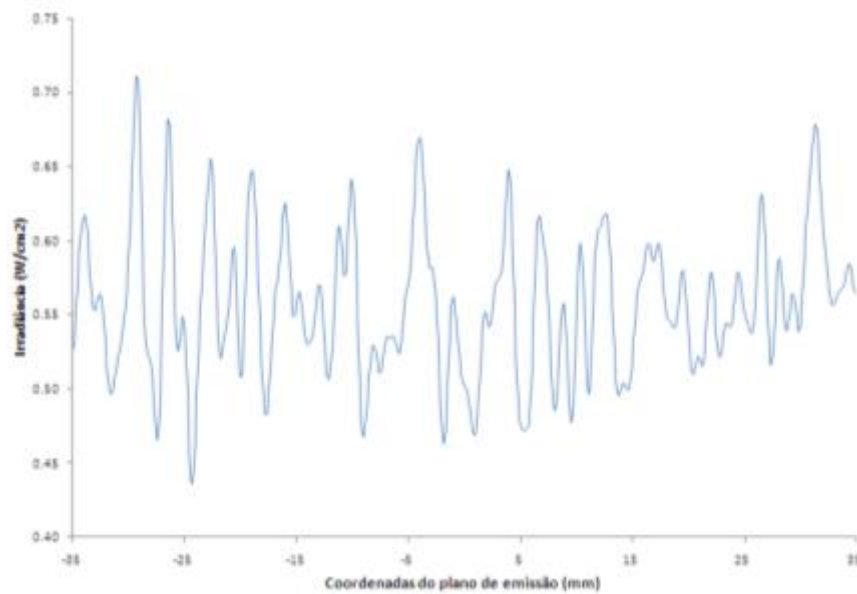


Figura 64 - Colunas de dados de irradiância extraídos da distribuição espacial da Figura 63 b).

Através dos dados recolhidos na extração, podemos fazer um cálculo dos valores médios para uma melhor percepção do sucesso da simulação. Após esse cálculo, verificamos que se obteve um valor médio de $0,57 \text{ W/cm}^2$ o que se encontra muito próximo do ideal para a nossa experiência, podendo assim assumir-se que este teste se revelou um sucesso.

3.2 Detecção de Luz Parasita

Tanto na técnica de fotoluminescência como na de electroluminescência, é de extrema importância que a estrutura onde se procede á captação da luminescência proveniente às amostras, seja o mais estanque possível, seja para impurezas como para luz parasita exterior.

A eficiência destas técnicas baseia-se sobre a precisão da detecção dos fotões que são emitidos pelo fenómeno de recombinação radiativa, e para isso é importante que não exista nenhum tipo de interferência a interagir junto da camera que irá captar os fotões. Para essa finalidade, o dimensionamento da caixa porta amostras, foi feito de maneira a se obter a mais estanquicidade possível, tendo também atenção á interface do tubo de luz com a caixa, e ainda às ligações feitas para a técnica de electroluminescência, tais como, a instalação do LED e a passagem dos contactos da fonte de tensão para dentro da caixa.

Após todos os cuidados no dimensionamento da estrutura, elaborou-se uma análise relativa á detecção da luz parasita que possa intervir de modo negativo nas técnicas de luminescência.

Nesta análise implementou-se uma *wafer* no nosso porta amostras com todos os cuidados a ter com o isolamento na caixa, e sem se excitar a amostra, ou seja mantendo o laser desligado obteve-se o seguinte perfil a 3D.

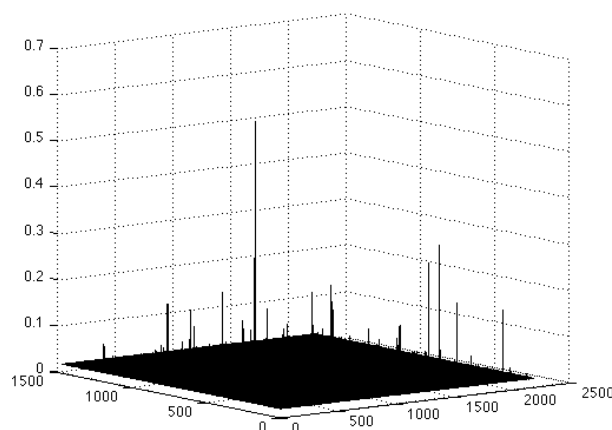


Figura 65 - Perfil 3D obtido na aquisição de uma imagem do interior da camera sem qualquer excitação da amostra.

De acordo com a primeira análise feita, é possível verificar a existência de um conjunto de “picos” muito discrepantes face á média de valores da análise, sendo por isso que os iremos assumir como ruído electrónico do sistema. De imediato se desenvolveu um filtro no MatLab capaz de remover o ruído e obter uma análise mais precisa da luz parasita.

Após a remoção do ruído electrónico, é possível dar-se inicio ao tratamento das imagens e a devida análise.

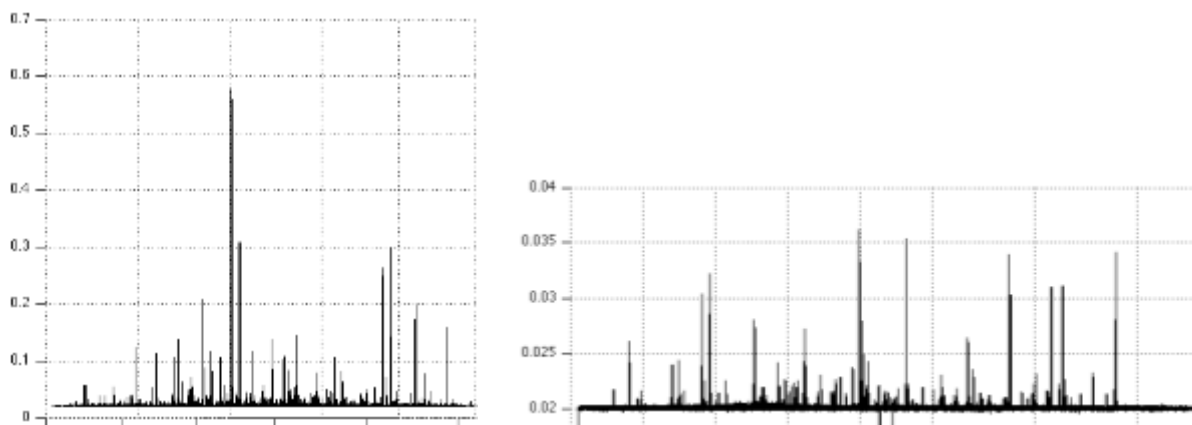


Figura 66 - Comparativo do perfil 3D no escuro antes e depois da aplicação de um filtro mediana de 2D. a) Antes da aplicação do filtro; b) Depois da aplicação do filtro.

O filtro aplicado nesta análise foi o filtro “*medfilt2*” do software MatLab, este tipo de filtro executa uma filtragem mediana da matriz em duas dimensões. Cada *pixel* de saída do filtro contém o valor mediano da vizinhança $m \times n$ em torno do *pixel* correspondente à imagem de entrada.

Na análise dos resultados é completamente perceptível, que na Figura 66 b) a intensidade do sinal reduziu imenso estando agora o sinal muito mais homogêneo e sem aqueles picos aberrantes que poderiam vir a perturbar a experiência.

Em todas as análises elaboradas, este filtro é aplicado de modo a remover estes mesmos picos.

3.3 Focagem

Tal como em todas as utilizações na arte da fotografia, é necessário umas noções de como focar e como manipular a abertura da objectiva da nossa camera de maneira a otimizar o resultado. No entanto existe outro factor de clara importância para este ponto de interesse do nosso projecto. A focagem nesta gama de comprimentos de onda, infravermelhos de gama curta ($700\text{-}\lambda\text{-}1500$), funciona de um modo diferente de uma utilização comum do dia-a-dia de um fotógrafo que trabalha com comprimentos de onda na gama do visível ($400\text{nm-}\lambda\text{-}700\text{nm}$).

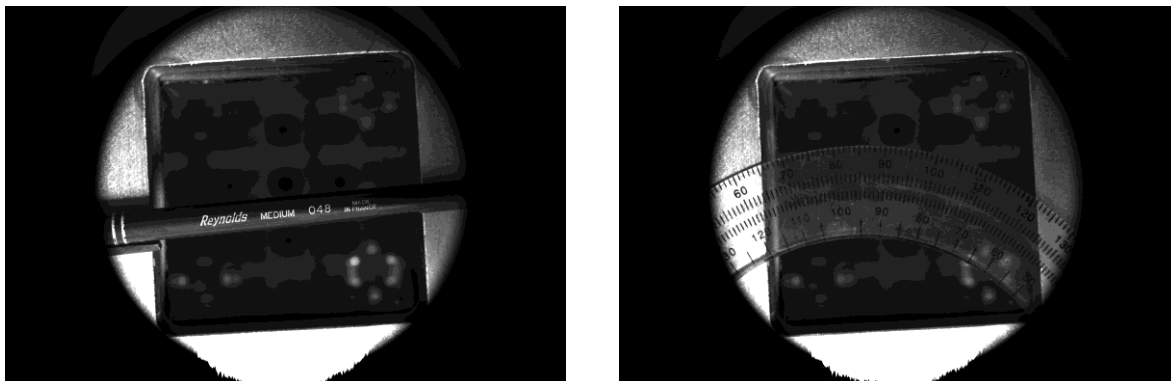


Figura 67 - Fotos teste á focagem da camera para uma iluminação natural.

Nestas imagens verificamos que para o espectro de radiação visível a focagem a que se submeteu a objectiva foi a adequada para este tipo de fotografia, e verificámos que para a mesma base de focagem numa imagem de infravermelhos, obtivemos uma imagem muito “borrada” e desfocada ao contrário da Figura 67, impossibilitando assim uma análise apropriada para o trabalho. Isto confirmou as suspeitas iniciais, de que seria necessário proceder a um estudo da calibração da objectiva da camera para a gama dos infravermelhos.

No estudo da focagem do nosso sistema, reaproveitou-se um pedaço de uma célula já com os contactos inseridos no material. Para este estudo e tendo em conta a célula que se ia utilizar, montou-se o equipamento de EL, e obteve-se a seguinte imagem de luminescência (Figura 68).

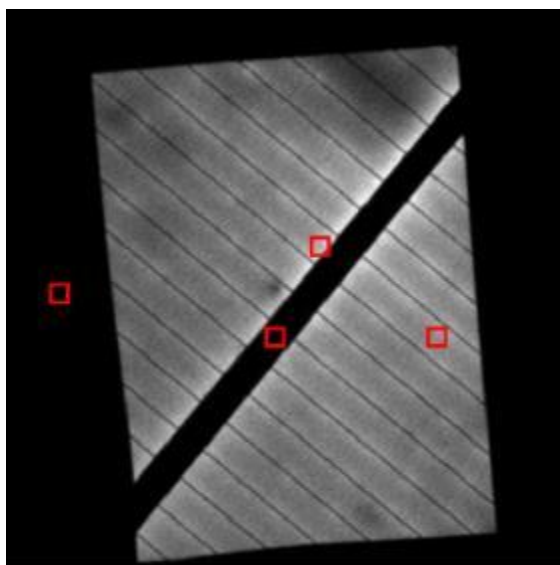


Figura 68 – Eletroluminescência feita numa célula de silício monocristalino, de onde se recolheu dados relativos a 4 pontos específicos da célula: Preto, *bus bar*, perto *bus bar* e um ponto luminescente isolado.

Nesta imagem seleccionamos 4 pontos da célula onde iríamos medir as variações da intensidade de luminescência com a variação da abertura da objectiva da camera, e tentar a olho nu obter uma ideia de qual seria a focagem mais apropriada para as imagens que estávamos a obter. Escolheu-se aleatoriamente um ponto na região escura da imagem, um ponto na *bus bar* da célula, outro numa região perto da *bus bar* e outro ponto numa região do material (zona clara). Obtendo-se os seguintes gráficos para a abertura e focagem da camera.

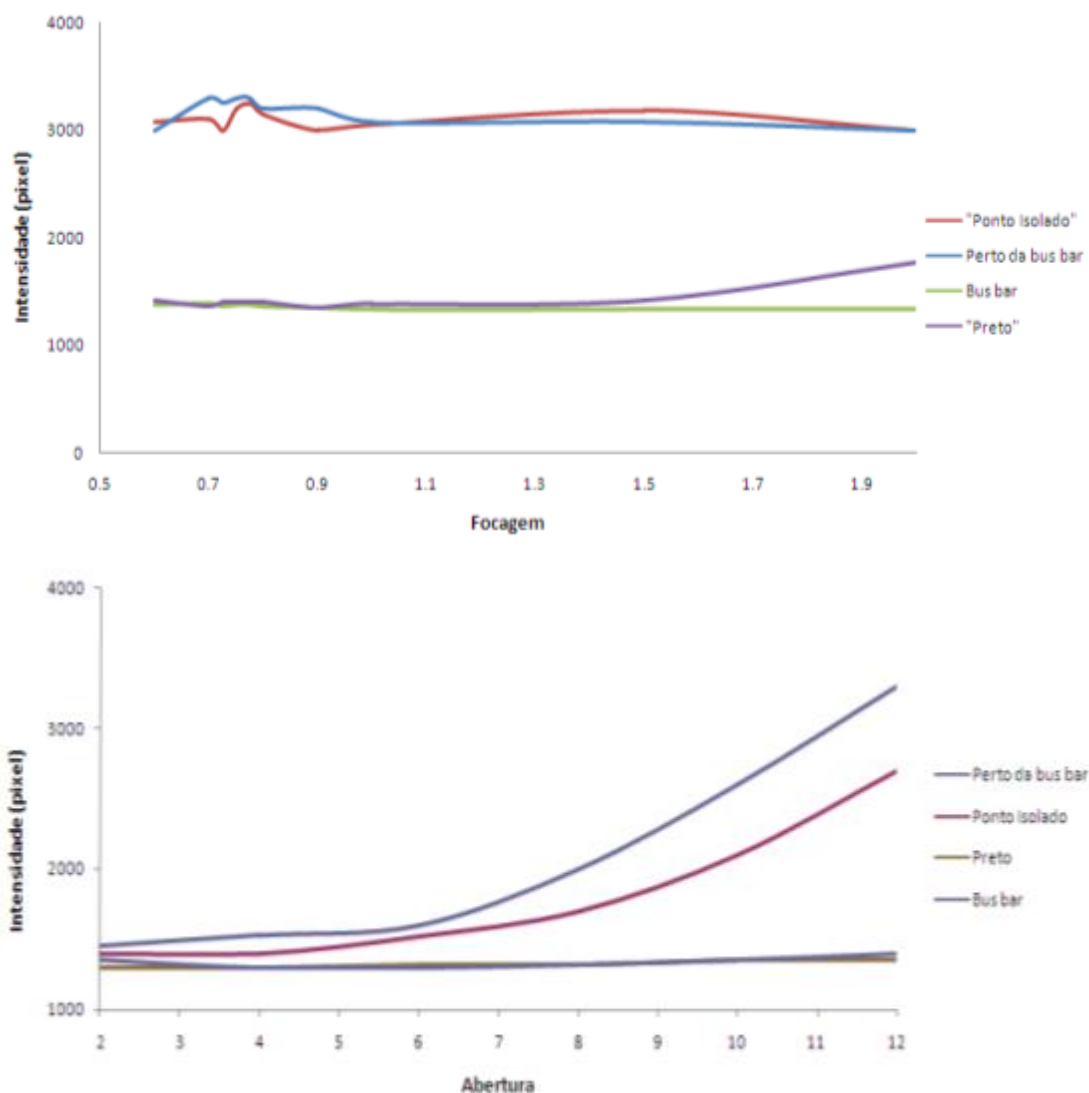


Figura 69 - Estudo da focagem e abertura do sistema. a) Análise á focagem, eixo do x: posição marcada no anel de focagem (Figura 70); b) Análise á abertura, eixo do x: número de passos do anel de abertura.

Na análise da abertura, é clara a influência da abertura da lente da objectiva para os ganhos de luminescência, não tendo sido detectado qualquer perda na focagem.

Na definição da focagem, a especificação de uma posição do anel de focagem não era possível tal como pode verificar na Figura 70, além do facto de não existirem regiões na escala de focagem marcadas também o facto de não existir uma marcação que dê ao utilizador uma noção da focagem actual. Para tal, marcou-se com um risco o canhão da objectiva de maneira a termos uma percepção do avanço ou recuo na focagem, estando marcado na Figura 70 com uma seta azul.



Figura 70 - Fotografia do canhão da objectiva com a focagem definida como ideal.

Como no início do estudo não tínhamos a certeza de que método aplicar para a definição da focagem, tentou-se fazer uma análise a olho nu, tentando assim perceber que focagem era a mais apropriada, tendo ficado a percepção que seria na gama de focagem entre os 0.6 e 1. Apesar de na análise da Figura 69 se ter adquirido mais pontos para essa gama de focagem, não foi possível concluir nada em concreto e por isso mesmo procedeu-se a outra abordagem. Para tal utilizou-se um conjunto de células *Laser Grooved Buried Contact* de silício mono cristalino, tendo como objectivo a sua implementação num novo sistema de concentração, células gentilmente cedidas por uma colega juntamente com os seus parâmetros característicos. As células possuem as seguintes dimensões:

Tabela 8 - Dimensões físicas da célula *Narec* utilizada no estudo.

Dimensões das células:	
Largura do finger	0.0035-0.0040 cm
Comprimento da célula	6.05 cm
Largura da célula	1.45 cm
Número de fingers metálicos:	~85fingers

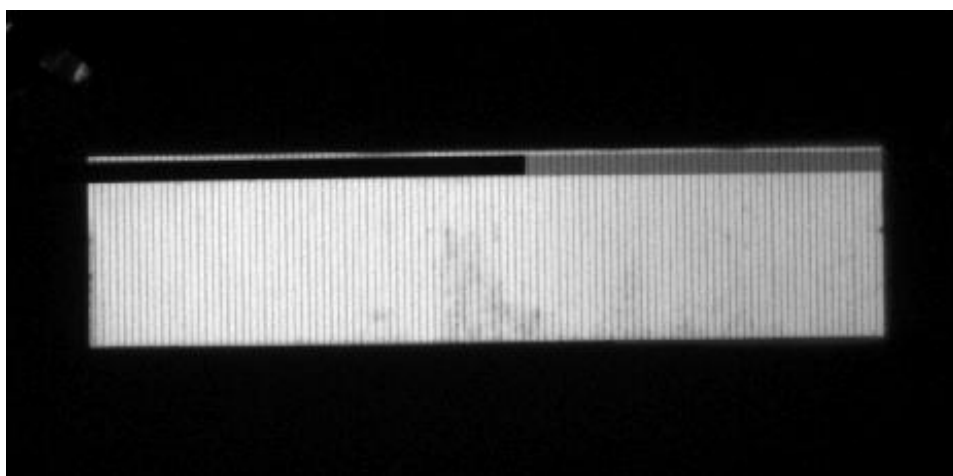


Figura 71 - Eletroluminescência da célula *Narec* de referência utilizada para o teste de focagem.

Para elaborar o estudo de optimização da focagem, procedeu-se a uma série de aquisições de imagens das células *Narec*, onde a única variável em todo o sistema seria o nível de focagem (0.6, ± 0.8 e 1.5), de acordo com os valores lidos no canhão da objectiva (Figura 70)

Após a aquisição das imagens de eletroluminescência, através de uma rotina criada em MatLab, retirou-se uma série de dados de *pixels* perpendiculares aos *fingers* da célula de modo a obter um perfil das intensidades de luminescência com a resolução obtida por pixel

Obteve-se os seguintes perfis através do MatLab para diferentes focagens da célula *Narec*.

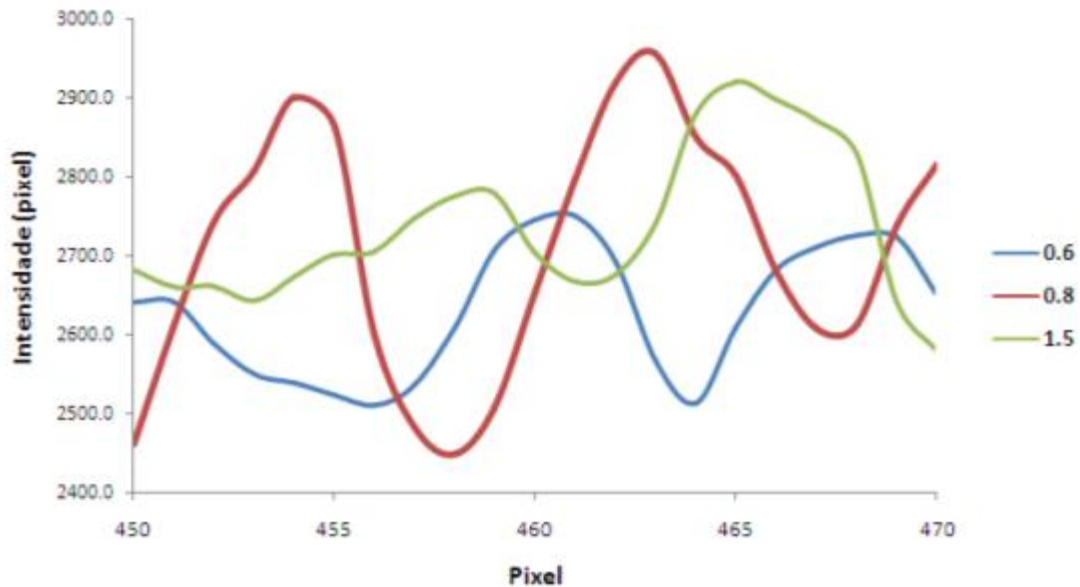


Figura 72 - Perfis de intensidade por pixel para diferentes focagens.

Na análise comparativa entre todas as focagens, é de salientar que os picos mais bem definidos e que no entanto conciliam uma intensidade razoável em comparação às outras focagens são os do perfil da focagem 0.8, que na imagem acima se encontra a vermelho, mais carregado e saliente que os outros para uma melhor percepção.

Outro ponto de referir nesta análise, é o facto de se poder definir a resolução destas imagens. Analisando a posição dos pixéis correspondentes aos picos máximos de intensidade e medindo a distância entre os mesmos (período), podemos definir em unidades de *pixel* a largura dos *fingers*. Verificou-se que o período em unidades *pixel* era de 7pixels (com margem de erro de 1pixel), assumindo então que a largura dos *fingers* será a mesma, e que o valor dado inicialmente pelo fabricante é válido, obtém então a seguinte resolução

$$\text{Resolução} = \frac{\text{Medida do fabricante } (\mu\text{m})}{\text{Período do sinal (pixel)}} \quad (\text{XLI})$$

$$\text{Resolução} = \frac{40\mu\text{m}}{\cong 7\text{pixel} \pm 1} \cong 5.7 \pm 1 \frac{\mu\text{m}}{\text{pixel}}$$

Este valor, é para um único eixo, assumindo que a resolução é igual para todas as direcções, a resolução obtida é de $5.7\mu\text{m} \times 5.7\mu\text{m}$.

3.4 Análise aos filtros e a sua influência na luminescência

Um outro tipo de análise, é a do comportamento da luminescência quando confrontada com diferentes filtros, mais especificamente *Short Pass Filters*, SPF. Tal como referido anteriormente, de modo a garantir que nenhuma parte da radiação do laser alcança a camera foi inserido para todas as análises feitas nesta dissertação um filtro LPF de 900nm. De agora em diante sempre que for referido que não se aplicou nenhum filtro para a aquisição das imagens, significa que apenas se encontra o filtro LPF de 900nm inserido no sistema.

Nesta análise utilizando a célula multicristalina de referência que temos utilizado, gerou-se por fotoluminescência 3 imagens com diferentes filtros associados. Uma imagem sem qualquer filtro, e outras duas com filtros SPF, de comprimentos de onda: 950nm e 1000nm. Para uma melhor percepção do impacto físico destes filtros na luminescência elaboraram-se os seguintes perfis.

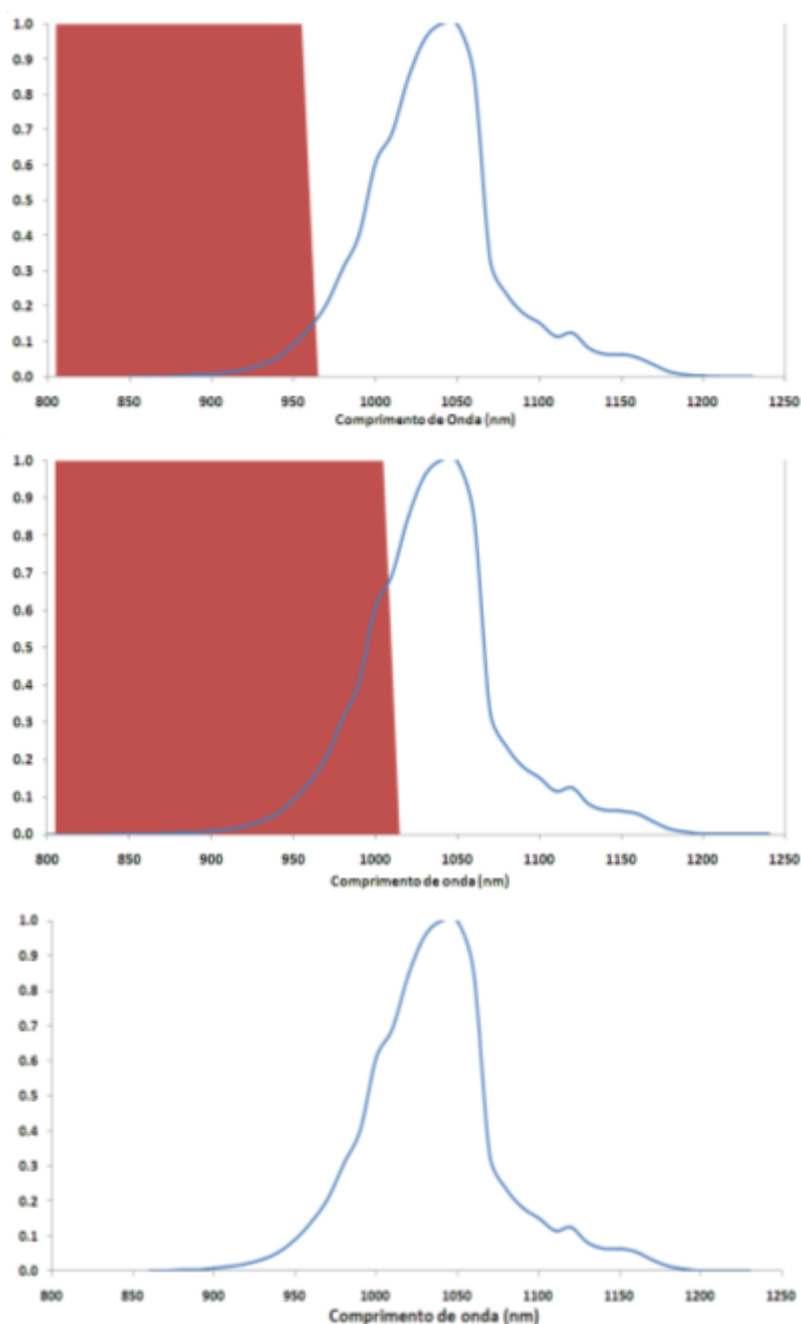


Figura 73 - Aplicação de filtros SPF no perfil de emissão normalizado. a) SPF950; b) SPF1000; c) Sem filtro aplicado.

Nas Figura 73a), b) e c) é possível verificar a parcela do perfil que será bloqueada pelo filtros (região a vermelho) sendo a restante parcela detectada naturalmente pela camera CCD. Nesta análise, tivemos a necessidade de delimitar as funções dos filtros como sendo funções de degrau como é retratado na teoria, apesar de que em situações reais os filtros não possuem este comportamento (Anexo IX). Na Figura 74 é possível visualizar uma previsão ao comportamento da intensidade para diferentes filtros.

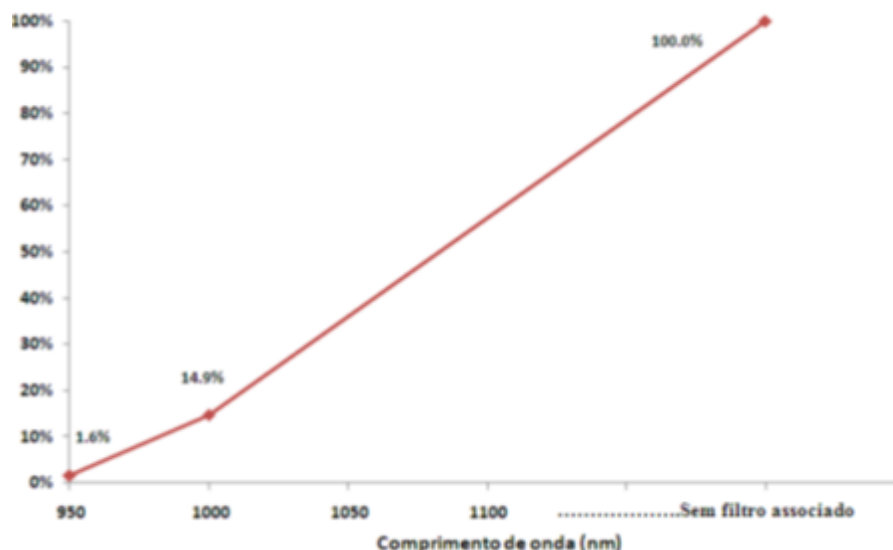


Figura 74 – Gráfico comportamental estimado para a intensidade dos três filtros em análise.

A estimativa teórica diz-nos que para um corte por SPF de 950nm apenas 1.6% do perfil geral são detectados, e que para um filtro SPF de 1000nm cerca de 14.9% do perfil é que são captados pela camera. De maneira a validar este estudo podemos através da integração de uma média de fotões correspondentes a uma área definida numa imagem de luminescência sem qualquer tipo de tratamento, e repetindo o mesmo processo aplicando diferentes filtros, é possível obter o seguinte perfil de relação entre as intensidades de luminescência detectadas.

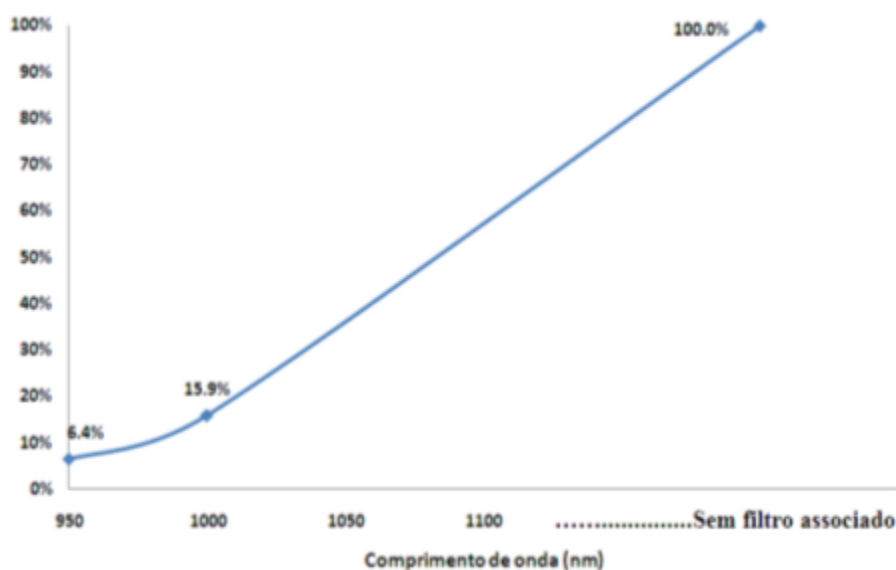


Figura 75 Gráfico comportamental obtido experimentalmente através da integração de três imagens geradas por PL com diferentes filtros aplicados.

Como se pode verificar, constata-se que existe uma proximidade grande entre os valores teóricos e os práticos, apesar dos valores correspondentes ao filtro SPF de 1000nm serem bastante semelhantes e satisfatórios, os relativos ao SPF de 950nm eram bastante discrepantes. Estas discrepâncias devem-se ao facto dos filtros não se comportarem como funções de degrau como são contabilizadas aqui, mas sim como filtros imperfeitos. O caso do filtro de SPF 950 ser mais afectado pode ser justificado dado o facto de estes cálculos terem sido elaborados utilizando a eficiência quântica da camera errada, muito embora as eficiências quânticas em questão não variem muito consideravelmente. A acção da eficiência quântica nesta situação específica, apanha toda a região de emissão dos perfis relativos ao filtro SPF 950nm, o que nos diz que apesar da ligeira diferença entre as EQ o impacto dessa diferença pode afectar significativamente a emissão de luminescência e daí a discrepância entre os valores.

3.5 Rácio de diferentes imagens de luminescência

Em 2007 Peter Wurfel introduziu um método para determinar espacialmente o comprimento de difusão dos portadores minoritários em células solares através do rácio entre duas imagens geradas por electroluminescência[14][28][25].

De acordo com os estudos realizados por Peter Wurfel[14], o rácio da divisão de duas imagens de luminescência resultantes de aquisições com filtros diferentes, resulta num valor indicativo do comprimento de difusão *absoluto* (tempo de vida *absoluto*) livre de todos os factores externos ao material que influenciem os valores de luminescência medidos num única imagem de luminescência, permitindo também dispensar a necessidade de uma calibração.

$$\text{Rácio de Intensidade} = \frac{\frac{dj_{y,em} \hbar \omega}{d\hbar \omega} \cdot EQ_{camera} \cdot SPF_1 \cdot d\hbar \omega}{\frac{dj_{y,em} \hbar \omega}{d\hbar \omega} \cdot EQ_{camera} \cdot SPF_2 \cdot d\hbar \omega} \quad (XLII)$$

De acordo com as publicações de Wurfel, após a obtenção do rácio seria necessário gerar um perfil teórico do rácio em função do tempo de vida para então fazer a ligação entre o rácio obtido experimentalmente e os tempos de vida absolutos do material. Para se obter o perfil teórico de conversão, necessitamos de seleccionar os dois perfis em função dos filtros que pretendemos utilizar. Uma vez mais devido à problemática da EQ da camera, que além de não ser a adequada ao equipamento, apresenta uma falha de dados para comprimentos de onda acima dos 1100 nm. Como o único perfil a ser afectado seria o que não possui nenhum filtro de SPF, decidiu optar-se pelo rácio entre o filtro SPF 950nm e o SPF 1000nm.

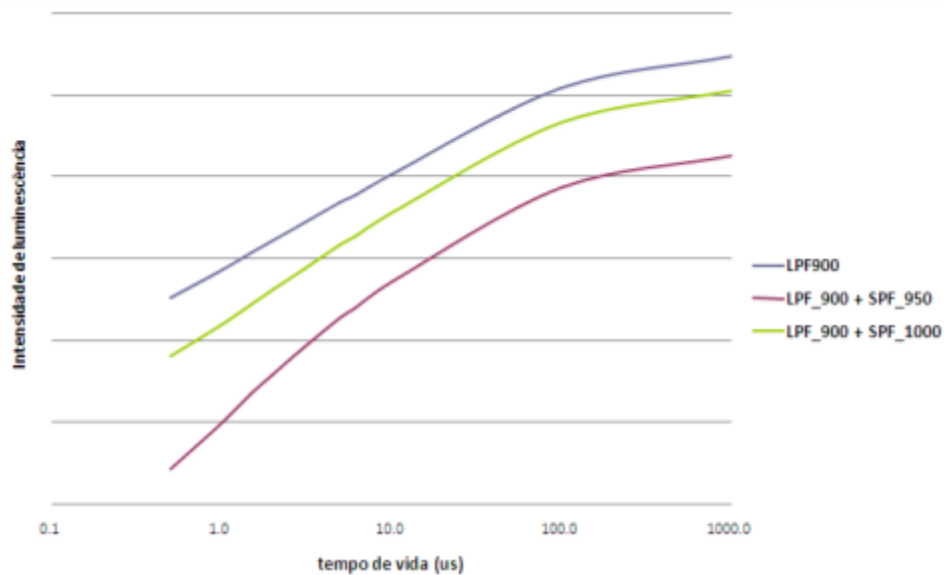


Figura 76 - Perfis de intensidade calculados em função do tempo de vida, sendo cada perfil específico para um determinado filtro.

Após a obtenção do rácio entre os perfis teóricos de cada filtro, é necessário relacionar cada valor de rácio a um tempo de vida específico, obtendo-se o seguinte perfil de rácio vs tempo de vida.

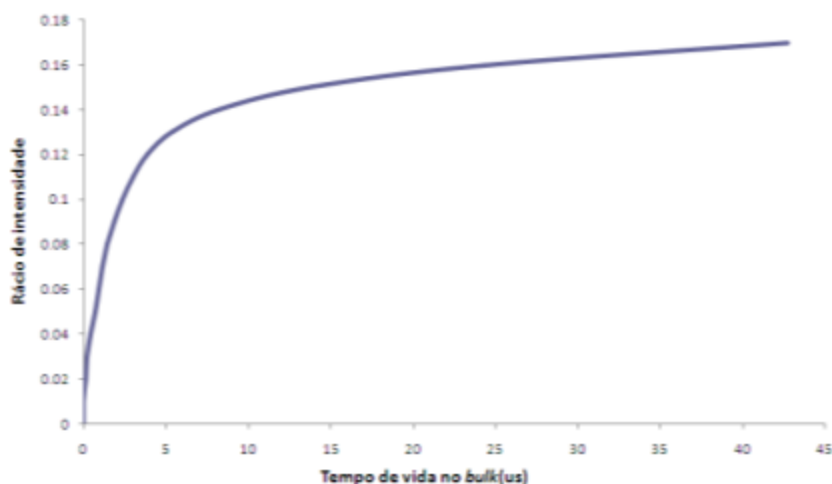


Figura 77 - Perfil teórico calculado do rácio de intensidade em função do tempo de vida absoluto do material.

Como referido, os filtros utilizados nesta análise foram os filtros de SPF de 950nm e de 1000nm, sendo as condições de base iguais às utilizadas nas análises anteriores, excepto o tempo de aquisição que foi na ordem dos 20 minutos.

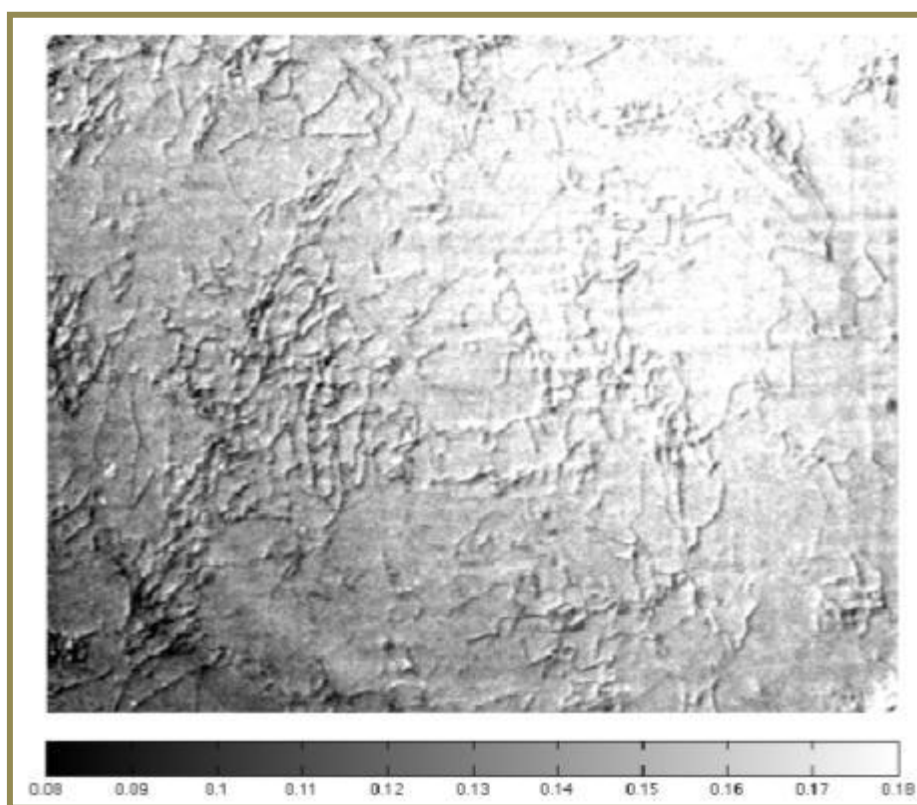


Figura 78 - Rácio de intensidades obtido a partir de duas imagens geradas por fotoluminescência utilizando dois filtros com comprimentos de onda de corte de 950nm e 1000nm. Imagem obtida por corte da imagem inicial, representando 80% da original.

Como primeira análise á imagem de rácio obtida, podemos verificar que existe forte emissão no canto superior direito da nossa amostra em comparação com a restante área de análise. Outro ponto a debater é um “sombra” existente em forma de anel sobre a imagem, podendo ser um caso de reflexão da

radiação na objectiva, e um ponto a resolver no futuro. Através desta imagem, e dos gráficos de calibração de rácio Vs tempo de vida e rácio Vs comprimento de difusão é possível obter novas imagens onde somos capazes de elaborar uma análise espacial á amostra dos valores absolutos de tempo de vida e comprimento de difusão (o coeficiente de difusão utilizado foi $36 \text{ cm}^2/\text{s}$).

Mais adiante será feita uma comparação entre a imagem obtida no rácio com uma imagem individual, e será perceptível a existência de regiões na amostra que possuem diferentes padrões de luminescência. Estas variações nos padrões de luminescência resultam de factores externos á qualidade do material que influenciam consideravelmente a análise de imagens individuais, daí que seja do interesse que se aplique este rácio de maneira a obter valores de tempos de vidas absolutos.

3.6 Software de Tratamento de Dados

Uma vez criada a estrutura e elaborada toda a série de estudos de optimização, é necessário que exista um determinado tratamento às imagens que o software da camera nos providencia. Para a elaboração deste tratamento, utilizou-se o software de programação MatLab para criar um programa executável que permita tratar as imagens e recolher os dados pretendidos para a caracterização da tecnologia.

Como debatido no capítulo de introdução desta dissertação, um dos parâmetros mais utilizados para caracterizar a tecnologia fotovoltaica é o tempo de vida (τ) característico do material. Para a caracterização da tecnologia através deste parâmetro, é necessário entrar em consideração com a relação estabelecida previamente entre a intensidade de luminescência e o tempo de vida (Figura 46)

Para se obter uma caracterização a mais precisa possível, é preciso ter em conta todo o processo físico que decorre desde a emissão da radiação proveniente da superfície da amostra, até se apresentar no executável em forma de uma caracterização de tempos de vida. Os factores que são necessários ter em conta são:

- Rácio de radiação incidente na objectiva da camera (ângulo sólido).
- Eficiência Quântica da camera CCD.
- Ganho aplicado pelo software da camera.
- Tempo de exposição da camera á radiação.
- *Binning* aplicado nos pixéis.

Os dois primeiros pontos já se encontram definidos nesta dissertação, falta portanto enquadrar os outros 3 pontos no sistema.

O Ganho que o software da camera aplica na imagem está dividido em 4 diferentes níveis. Na *data sheet* da camera (Anexo III) vem desciminada a influência do ganho nas contagens de fotões, tal como vem na seguinte tabela:

Tabela 9– Aplicação do ganho na leitura das imagens. Constantes de conversão do ganho da camera CCD (k).

	k	
Ganho 1	1.64	e⁻/ADU
Ganho 2	1.2	
Ganho 3	1.04	
Ganho 4	0.84	

A sigla ADU (*analog to digital units*) representa a leitura que o software da camera apresenta após a aplicação do ganho, ou seja, num caso onde o ganho seja de nível 4, o número de fotões que atingem o fotodetector são apenas 84% do transmitido pelo software da camera

Outro factor de grande importância é o tempo de exposição a que se expõe o fotodetector da camera á radiação emitida. Um tempo de exposição elevado permite obter uma maior contagem de fotões e imagens mais estáveis e precisas. A relação entre a intensidade da luminescência e o tempo de exposição é linear, e dado que os perfis elaborados da emissão de luminescência correspondem a emissões por segundo, deste ganho resulta uma contagem n vezes superior o número de segundos de exposição de nossa escolha.

Além do ganho e do tempo de exposição é preciso ter em conta o *binning* aplicado durante a aquisição das imagens, uma vez que é um factor que influencia a contagem de fótons por *pixel*. O *binning* é um factor característico do equipamento e tem a ver com a sensibilidade do fotodetector, e de acordo com a *data sheet* do modelo utilizado nesta dissertação, existe a seguinte relação:

Tabela 10 – Aplicação do *binning* na leitura das imagens, níveis de saturação dos pixéis.

Sem <i>binning</i>	<i>Binning</i> a duas dimensões (2x2, 3x3,...)
55000	110000
e^-	

A compreensão do significado físico do *binning* no sistema aqui estudado pode ser algo complexo. Os valores na Tabela 10, representam o número máximo de fótons que um *pixel* pode representar (sem *binning*) e para *binnings* a duas dimensões o valor duplica. Explicando de outra maneira, o valor lido no software da camera corresponde a uma conversão sobre o número de fótons proveniente de cada *pixel* lido, onde o software para melhor processar os dados faz um *fit* a este valor de acordo com os máximos que cada *pixel* pode ter. Assumindo o caso de o *binning* ser de 2x2, logo o valor máximo que cada *pixel* pode suportar é de 110000 (e^-) sendo o valor transmitido pelo software de 0.05 (5% do *pixel* preenchido) isto resulta de uma emissão de 5500 fótons/*pixel*.

Apesar de se ter analisado esta série de parâmetros, é importante de frisar que ainda se desconhece alguns factores de influência para este tipo de análise, tais como a influência da objectiva da camera, o impacto do facto dos filtros não serem ideais, a diferença nas EQ da camera tal como as reflexões no interior da caixa estanque e nos próprios discos dos filtros. Apesar disso vai se prosseguir com esta abordagem e verificar que resultados se obtêm.

Tendo em conta todos os factores acima descritos e outros previamente debatidos nesta dissertação, era intenção a criação de um programa executável em MatLab (GUI) que permitisse tratar de uma maneira rápida e precisa as imagens que se extrai do software da camera, infelizmente não surgiu oportunidade de terminar o programa a tempo da entrega deste documento ficando apenas a seguinte figura para ilustra o que está a ser feito.

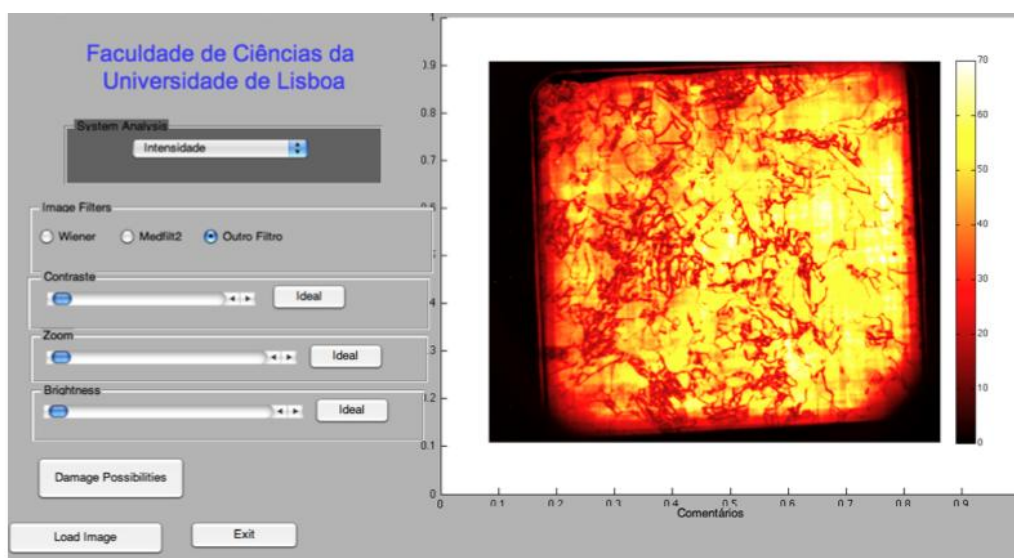


Figura 79 - Interface do software executável de tratamento dos dados de luminescência. Versão preliminar.

Na Figura 79 é possível ver que é pretendido dar a possibilidade aos utilizadores de optar entre 3 análises á escolha, optando pela leitura do tempo de vida, do comprimento de difusão ou somente da intensidade de luminescência da amostra. Além da variabilidade das análises a fazer, é colocada á disposição uma interface de tratamento de imagens onde se pode regular o brilho, contraste e até mesmo o mapa de cores a utilizar.

É tido como objectivo a apresentação na defesa desta dissertação o programa já terminado e pronto a utilizar no laboratório.

4. Resultados Experimentais

Após a verificação e implementação física de todos os sistemas, tanto o de EL como o de PL, seleccionou-se logo no início desta dissertação que células iríamos analisar.

No estudo da Fotoluminescência, utilizaram-se *wafers* multicristalinas pertencentes ao laboratório, com as seguintes características.

Tabela 11 - Características físicas da *wafer* de silício multicristalino.

Wafer Multicristalina	
Tipo de Dopagem	Tipo- <i>p</i> (Boro)
Resistividade	0.5 a 2.0
Espessura	300 μm \pm 40
Dimensões	10cm x 10cm



Figura 80 - *Wafer* de silício multicristalino utilizada no estudo da técnica de fotoluminescência.

No estudo de Eletroluminescência, analisaram-se dois tipos de células. As células disponibilizadas para o estudo foram, o pedaço de uma célula monocristalina básica e a célula *narec* (monocristalina), ambas referenciadas no estudo da focagem.

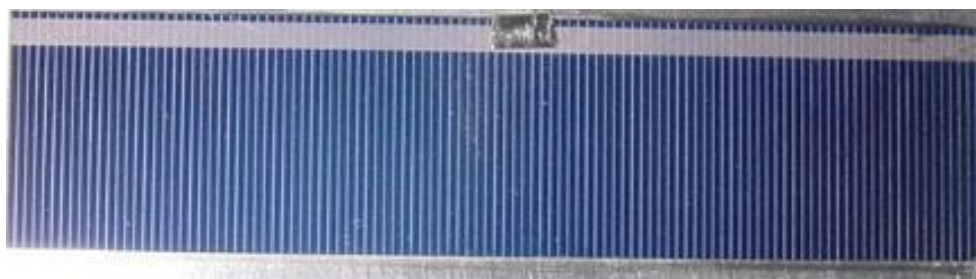


Figura 81 - Uma das células *narec* utilizada durante o desenrolar desta dissertação, sendo utilizada tanto para testes de optimização como para fins industriais.

Além dos parâmetros dados na Tabela 8 e a aplicação para as quais se destinavam, não nos foi disponibilizada mais nenhuma informação sobre estes dispositivos.

4.1 μ PCD – Micro-WavePhotoconductivityDecay

A utilização desta técnica vem da sua utilidade como sistema comparativo na conversão de intensidade de emissão para tempos de vida com as técnicas de EL e PL.

Tendo em conta o carácter pontual desta técnica, elaboraram-se uma série de 6 medidas em 6 pontos distintos da amostra a analisar, tendo sido obtido os seguintes valores para o tempo de vida.

Tabela 12 – Série de dados experimentais do tempo de vida em μ s obtida com a técnica de μ PCD.

-	1	2	3	4	5	6	Média
Wafer							
Multicristalina	3.26	3.65	3.07	3.30	3.87	3.66	3.47

De referir uma vez mais que estes valores de tempo de vida, são tempos de vida efectivos do material, enquanto que os tempos de vida obtidos por PL e EL correspondem a valores absolutos do *bulk* da amostra. De referir que estas amostras não sofreram nenhum processo de passivação nas suas superfícies.

4.2 Fotoluminescência

Na análise dos resultados obtidos por fotoluminescência é de referir que foi aplicado um corte em todas as imagens em análise, este corte foi aplicado de maneira a integrar a região central da amostra que é a zona com maiores contrastes incluindo no entanto cerca de 80% da área activa da amostra.

Como abordagem inicial nestes resultados, iremos analisar o estudo feito das amostras a partir dos rácios de diferentes filtros, pegando no trabalho já efectuado no capítulo de estudo dos rácios, adicionando apenas o perfil de conversão de luminescência para comprimento de difusão da amostra estudada. Na Figura 82 encontra-se a caracterização espacial feita através da técnica dos rácios á amostra, sendo possível visualizar tanto a distribuição dos tempos de vida (a) como a do comprimento de difusão (b) dois parâmetros cruciais na caracterização de células fotovoltaicas.

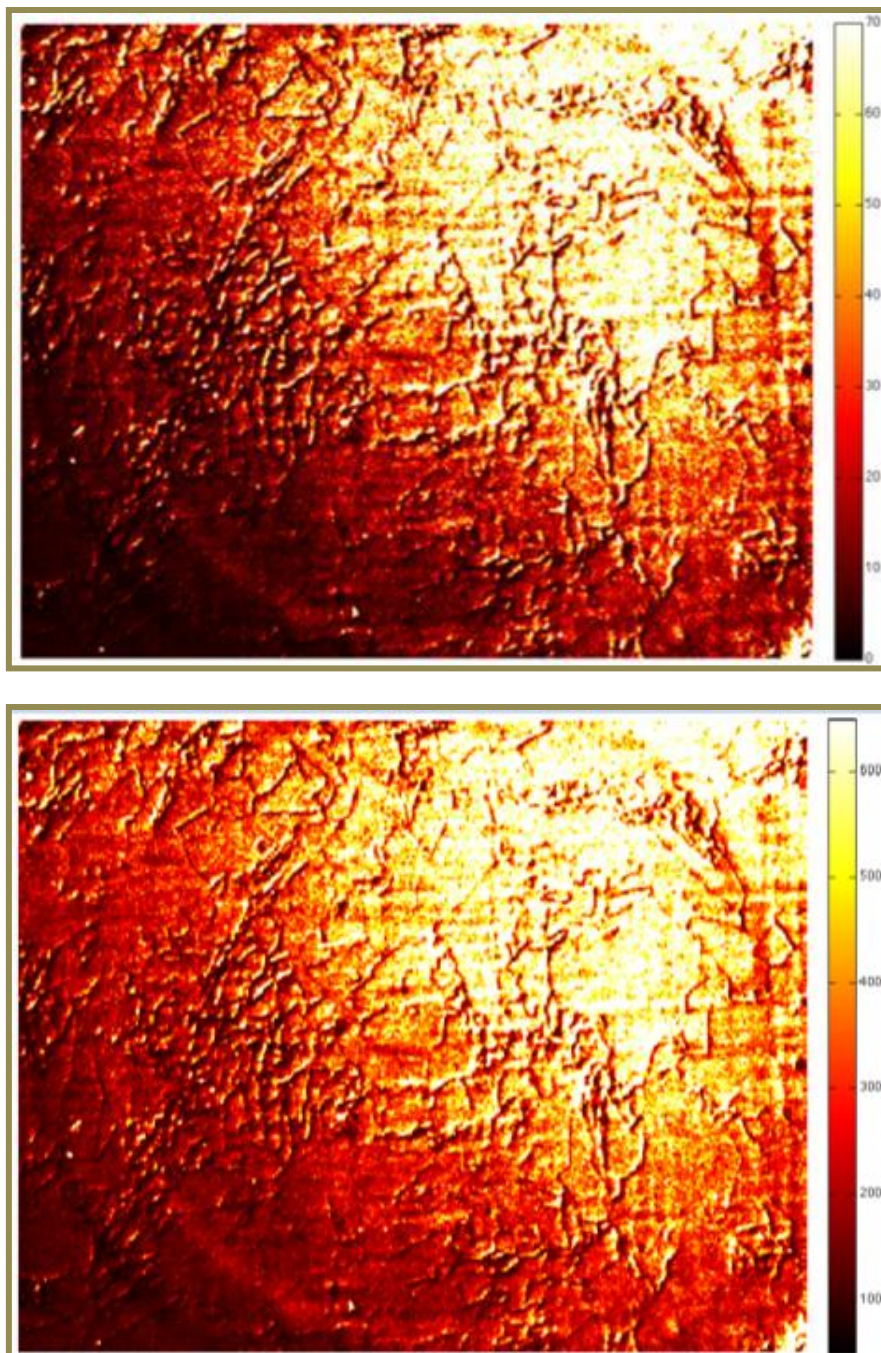


Figura 82 - Distribuição espacial dos tempos de vida (μs); a) e comprimentos de difusão (μm); b) absolutos calculados através dos rácios de intensidade.

Na leitura da Figura 82 é imediatamente perceptível uma região mais brilhante, o que de acordo com a barra de cor corresponde aos tempos de vida e comprimentos de difusão mais elevado, estando na ordem dos $70\mu\text{s}$ e dos $600\mu\text{m}$. De referir que as regiões a branco correspondem a rácios de luminescência extremamente elevados, e que na elaboração desta imagem limitou-se todas as regiões com rácios muito acima dos valores de médios a converterem para os $70\mu\text{s}$ e os $600\mu\text{m}$ sendo mapeados com a mesma cor.

A região com menos brilho, logo com tempos de vida mais baixos, em contraste com o resto da região activa da amostra, revela-se muito interessante, pois á primeira vista temos uma região com tempos de vida baixos coincidentes com uma zona bastante marcada por defeitos, e por isso zonas propícias a terem elevadas velocidades de recombinação responsáveis pelos baixos tempos de vida. Através desta distribuição de defeitos é possível observar nesta imagem uma relação entre os defeitos visíveis na amostra e o brilho relativo ao rácio das intensidades de luminescência, obtendo um foco de brilho no canto superior direito onde existe pouca densidade de defeitos e ao redor desse foco a densidade de defeitos é superior e proporcionalmente o brilho relativo aos tempos de vida diminui.

Esta distribuição concentrada de defeitos para o canto inferior esquerdo leva a querer que na fase de corte desta *wafer*, a região seleccionada para o corte era uma região próxima das bermas do lingote de silício, dado que as bermas são locais com uma densidade de defeitos muito elevada tal como sugere a amostra em estudo (Figura 83).

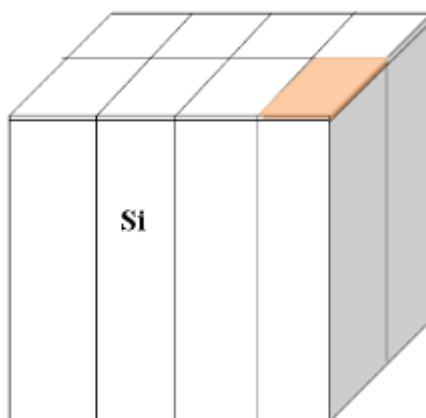


Figura 83 - Corte de um lingote de silício e possível localização do corte feito para o lote de onde pertence esta *wafer*.

Uma vez que a análise espacial está feita, é necessário agora analisar os valores de tempo de vida obtidos e interpretá-los de acordo com as condições impostas e comparativamente com os valores obtidos com o μPCD . Na análise preliminar feita com o μPCD obtivemos uma série de valores com uma média de $3.47\mu\text{s}$, mas tal como já referimos anteriormente, a técnica de μPCD apenas calcula o valor efectivo do tempo de vida, ou seja, contabiliza tanto o peso do tempo de vida á superfície como o tempo de vida no *bulk* (XIX). Uma vez que é á superfície que o factor recombinativo é mais forte, e pelo contrário no *bulk* é onde se pode encontrar as regiões mais puras e de melhor qualidade, é de esperar que o tempo de vida efectivo seja sem dúvida muito mais reduzido que o valor medido do tempo de vida no *bulk* graças á contribuição do tempo de vida á superfície.

De acordo com a leitura da Figura 82 a) e dos dados da mesma, obteve-se valores de tempos de vida que variavam entre os $10\mu\text{s}$ e os $70\mu\text{s}$, tempos de vida respectivos ao interior do material (*bulk*). De acordo com alguns autores[29], [32], que elaboraram trabalhos de comparação entre as técnicas de luminescência e de μPCD , veio-se a verificar que estas ordens de grandeza de tempos de vida obtidos para a luminescência se encontram muito dentro do comum para silício multicristalino e de que os resultados do μPCD são o reflexo de uma superfície possuidora de forte recombinação e que em principio não deve ter sido sujeita a nenhum tipo de tratamento de passivação.

Uma vez feita a análise ao rácio entre duas imagens de luminescência que nos dá um valor absoluto dos tempos de vida sem haver necessidade de calibração junto de outra técnica, decidiu-se analisar e testar a técnica de Fotoluminescência na aquisição de uma única imagem de luminescência. De acordo com a conversão intensidade de luminescência *versus* tempos de vida calculada previamente no capítulo de Fotoluminescência e com todos os factores descritos como influenciadores das nossas medidas desde o momento de emissão até á leitura dos dados no software da camera, adquiriu-se a seguinte imagem de intensidade de luminescência.

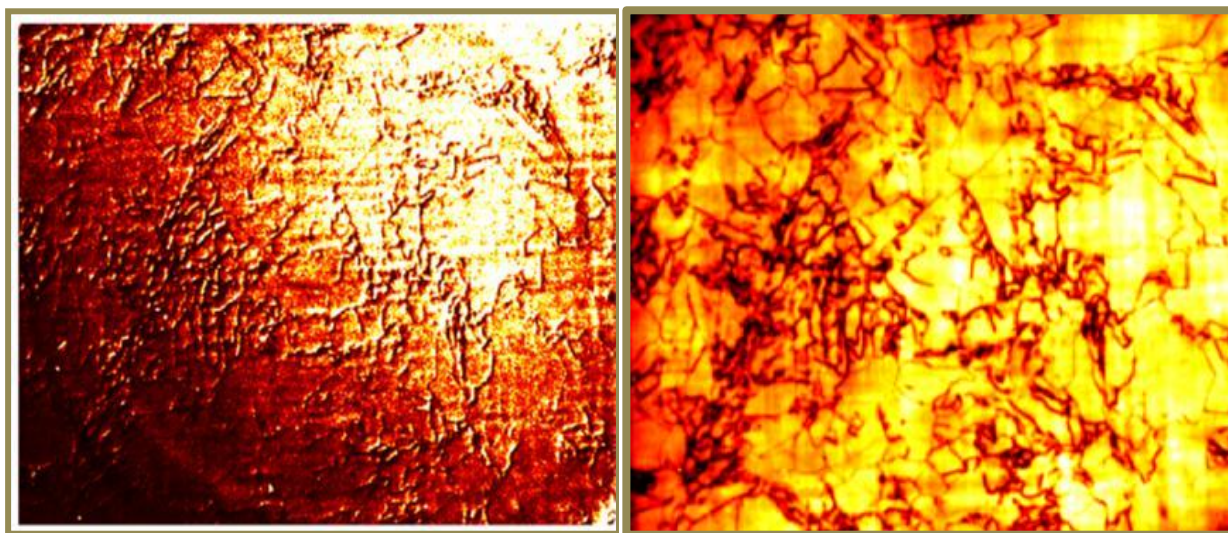


Figura 84 –a) Rácio obtido de duas imagens de PL com filtros de SPF 950nm e SPF 1000 nm. b) Imagem gerada por Fotoluminescência de uma wafer multicristalina com um tempo de exposição de 1200 segundos e com aplicação de um filtro LPF de 900nm.

Numa leitura da Figura 84a), nos padrões de luminescência mais intensos verificamos uma consistência clara com os resultados obtidos no estudo das imagens de rácio. Existe uma maior concentração de defeitos na região junto á berma esquerda do limite da *wafer* tal como na berma inferior também, pelo contrário no canto superior direito obtemos um padrão intenso de luminescência que é indicador de uma região de boa qualidade. É importante referir que a qualidade das imagens é muito superior às obtidas nos rácios permitindo uma leitura mais pormenorizada da amostra, sendo este diferencial na qualidade das imagens provavelmente provocado por um deslocamento na posição dos filtros que apesar de estarem “trancados” no sistema é possível que os mesmos não se encontrem idealmente normais à radiação ou as posições durante a troca dos filtros não tenham sido exactamente as mesmas, provocando o “borrar” da imagem de rácio. Na conversão do sinal obtido para tempos de vida, foi com surpresa que o resultado não era em nada coerente, estando com uma diferença de mais de uma ordem de grandeza dos resultados esperados para irem de encontro com os obtidos nos rácios. Após muito estudo e análise feita para justificar este tipo de resultado, chegou-se à conclusão de que é necessário estudar mais esta vertente da técnica para contabilizar que componentes experimentais é que afectam a intensidade do sinal de luminescência captado e qual o seu impacto sobre o mesmo. No entanto e dentro do tempo disponível até á entrega deste documento este tema foi estudado chegando á conclusão que os factores que estariam em falta contabilizar teriam de ser factores meramente multiplicativos e não factores relacionados com o comprimento de onda de emissão. Esta conclusão permite que o sistema seja alvo de uma calibração de acordo com os resultados de uma técnica já provada, mas dada a discrepância entre os resultados, por bom senso científico decidiu-se não se explorar esta calibração.

4.3 Eletroluminescência

A primeira abordagem feita á técnica de EL, feita no Capítulo 1.3.7.2, explica a física por trás da técnica e as aplicações para as quais é útil. Nesta parte da dissertação expomos os resultados práticos obtidos durante o seu estudo, e que análise se pode fazer com o sistema actual, e o que será possível vir a obter no futuro.

Na Figura 85 é possível visualizar uma imagem gerada por eletroluminescência a partir do reaproveitamento de uma célula partida.

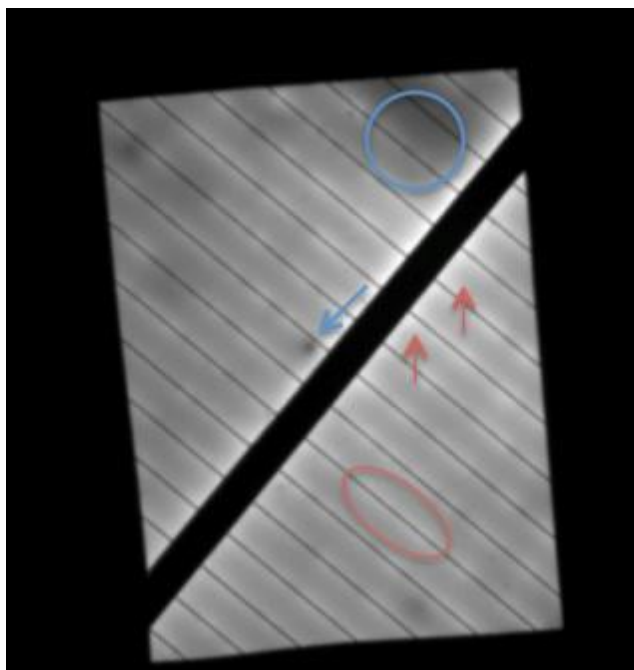


Figura 85 - Imagem gerada por EL de uma célula de silício monocristalino reprovada.

Esta imagem foi recolhida no início da nossa dissertação, e serviu um pouco para compreender o funcionamento da técnica, mais concretamente o método de excitação do material. Tal como referido anteriormente, a excitação e geração de portadores de carga na EL era baseada na injeção de uma corrente nos contactos metálicos da célula gerando assim uma corrente na *bus bar* da célula a analisar. Essa corrente injectada é então transmitida para os *fingers* que a ela se encontram ligados, transmitindo assim a corrente para toda a superfície da célula, corrente essa responsável pela excitação dos portadores de carga do silício. Esta excitação é visível na Figura 85, onde se verifica que nas regiões junto aos *fingers* e junto à *bus bar* a luminescência proveniente do material é mais intensa, decrescendo á medida que se analisa regiões mais afastadas dos contactos resultado da difusão dos portadores recentemente gerados naquela região (legenda a vermelho). Dado que a célula utilizada era um pedaço reaproveitado, era de esperar que a mesma não estivesse em condições óptimas e como podemos verificar na Figura 85 existem regiões da célula que luminescem pouco, podendo ser causadas por *fingers* partidos e/ou em mau estado, ou até mesmo má qualidade do material (legenda a azul).

De modo a colocar o nosso sistema numa situação de prática industrial, e tal como no caso do capítulo da focagem, foi cedido para esta dissertação um conjunto de células *Laser Grooved Buried Contact* de silício mono cristalino. Estas células estavam a ser utilizadas no estudo e selecção de um método de soldadura dos contactos metálicos, onde é do interesse uma análise às células antes e de depois da aplicação do método de soldadura, de maneira a escolher o mais indicado tendo em conta os danos infligidos pelo método. Uma vez que o processo de soldadura é um método fisicamente invasivo, a EL irá permitir ver regiões de pior qualidade do material, fissuras e até mesmo contactos metálicos partidos.

De seguida vai ser possível visualizar algumas imagens de EL feitas após a aplicação de diferentes métodos de soldadura, e onde é possível elaborar uma análise aos danos gerados, danos esses que seriam de dificuldade elevada de detectar recorrendo a um microscópio ou a um outro método de caracterização.

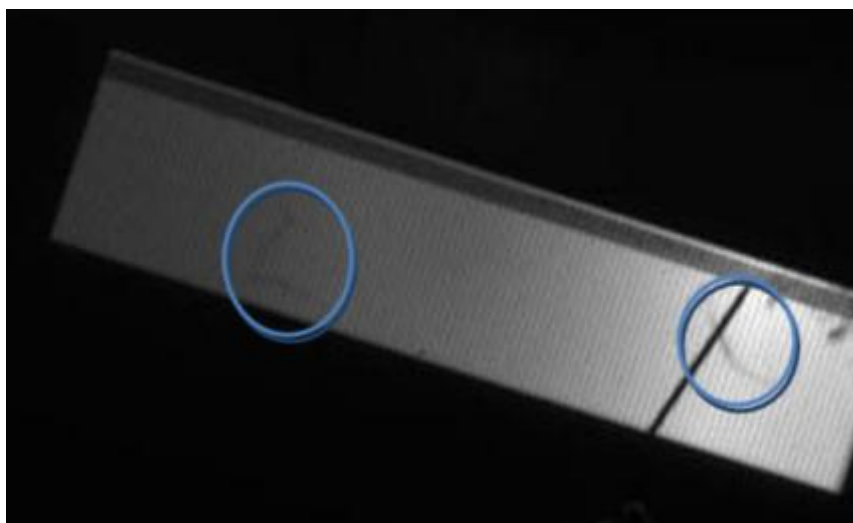


Figura 86 - Imagem gerada por EL de uma célula *narec* antes da aplicação da soldadura dos contactos metálicos.

Na Figura 86 podemos ver uma imagem de referência para o estudo de selecção do método de soldadura dos contactos, em que esta mesma imagem tinha sido adquirida antes de qualquer acção no estudo. Na primeira análise é possível visualizar duas regiões da célula (legenda azul) que se encontram danificadas revelando fissuras no material, mas que no entanto não aparentam ter danificado os *fingers*, caso tal sucedesse, as regiões da célula seguidas dessas fissuras não iriam luminescer e não se iria ver nada. Esta análise surtiu surpresa pois era esperado que a célula estivesse em condições impecáveis, para que após a aplicação da soldadura fosse possível identificar os danos causados pela mesma, sendo que sem a utilização da EL tal não seria possível. Na Figura 86 podemos ainda visualizar uma sombra preta sobre uma das regiões danificadas e que parece interceptar os contactos metálicos, essa sombra representa a agulha utilizada para estabelecer o contacto eléctrico e transmitir a corrente de excitação á célula levando ao padrão de luminescência mais intenso na zona mais perto do contacto da agulha.

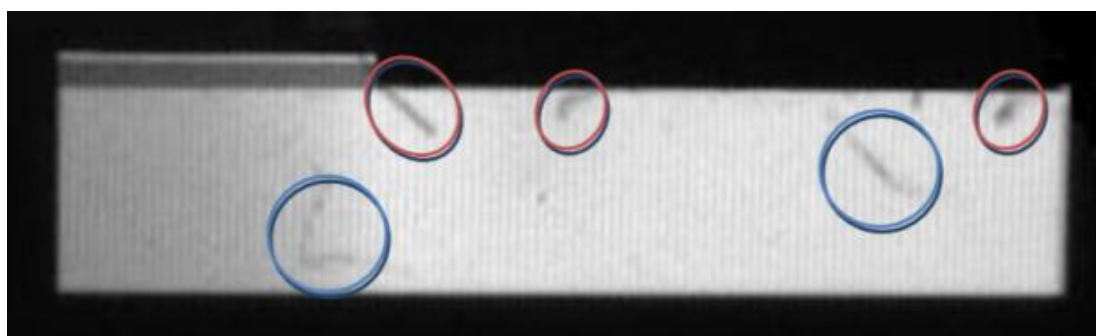


Figura 87 - Imagem gerada por EL de uma célula *narec* após a aplicação da soldadura dos contactos metálicos.

A Figura 87 representa a mesma célula da Figura 86 após a aplicação do método de soldadura, onde é possível visualizar a existência dos mesmos defeitos já visualizados na Figura 86 (legenda azul), mas ainda a existência de novos danos na célula criados após a aplicação da soldadura na célula legenda vermelha).

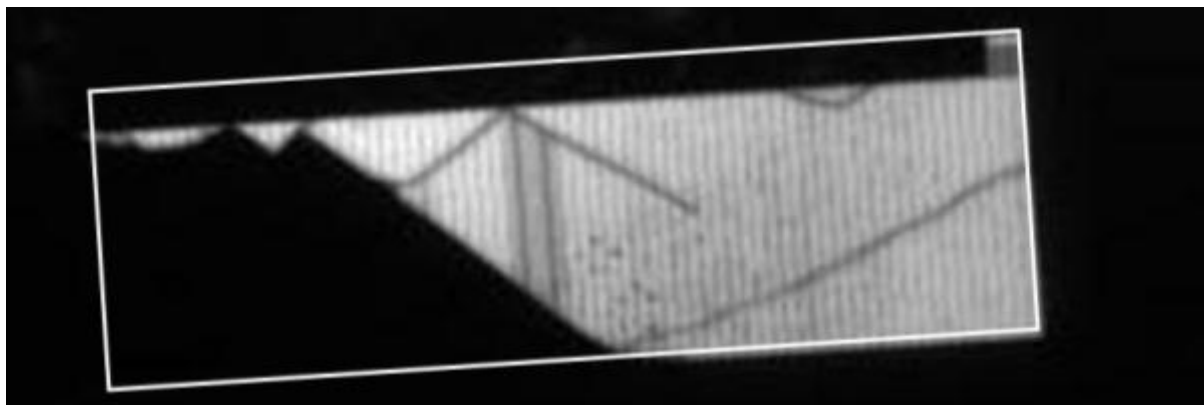


Figura 88 - Imagem gerada por EL de uma célula *narec* após a aplicação da soldadura dos contactos metálicos. Célula inutilizada devido aos extensos danos.

Na Figura 88 conclui-se rapidamente que esta célula ficou extremamente danificada pela aplicação da soldadura, e que se encontra inutilizada para o futuro. Apesar de todos os danos, é interessante verificar que uma parte da célula ainda luminesce, uma vez que nessa região e apesar dos danos os *fingers* ainda se encontram operacionais e a transmitir a corrente de excitação. Na parcela á esquerda da célula não ocorre luminescência alguma apesar da célula a olho nu não apresentar qualquer estrago de maior, já na imagem de EL essa parte da célula está representada a preto

5. Conclusão

A pressão crescente a nível da produção de tecnologia PV para se alcançar maiores eficiências a nível das células com um alto rendimento a baixo custo resulta numa necessidade crescente de se adoptar e melhorar técnicas de controlo e os processos de monitorização. Este documento apresenta duas técnicas de caracterização espacial de células solares utilizando imagens de luminescência. As técnicas de luminescência revelam-se fáceis de utilizar, podendo ser aplicadas á temperatura ambiente, não necessitando de nenhuma preparação específica para as amostras e livres de serem utilizadas em qualquer fase do processo de produção de células. Esta versatilidade apresentada pelas técnicas de luminescência combinada com os tempos de aquisição reduzidos, torna estas técnicas muito atraentes para as aplicações industriais a nível de melhor controlo e monitorização da qualidade. As técnicas aqui estudadas, a Fotoluminescência e a Electroluminescência, são técnicas de caracterização espacial capazes de medir em períodos de aquisição muito reduzidos o comprimento de difusão e os tempos de vida, revelando-se assim técnicas muito interessantes na monitorização em tempo real em linhas de fabrico de células solares.

Para a análise e estudo destas duas técnicas (PL e EL), construiu-se um sistema de caracterização de luminescência capaz de suportar as duas técnicas, existindo uma estrutura partilhada por ambas as técnicas sendo somente diferenciadas pelo método de injeccção dos portadores responsáveis pelo fenómeno de luminescência. Após a construção do sistema experimental de luminescência, foi necessária a sua validação através de uma série de testes feitos sobre o equipamento, desde á homogeneidade da injeccção dos portadores nas amostras em estudo até estanquicidade da estrutura de onde ocorre a luminescência. Na estrutura de PL, concluiu-se que seria mais adequado para a nossa experiência um *setup* de iluminação da amostra junto da superfície contrária á de detecção, ao contrário da mais convencional onde a iluminação é na superfície frontal, onde existe o risco dos filtros que protegem a camera de absorverem a radiação do laser começarem a fluorescer. Todos os testes elaborados no âmbito de validar o equipamento e todas as suas possíveis falhas, revelaram-se um sucesso, e partiu-se então de seguida para a validação da técnica nas condições impostas pelo nosso sistema experimental.

Na validação da componente de Fotoluminescência foi discutida uma técnica de medição espacial de tempos de vida, baseada na medição do rácio entre duas imagens de luminescência, cada uma com a sua banda espectral (diferentes filtros), e de seguida testada experimentalmente numa *wafers* de silício multi-cristalino, utilizando como base de comparação a técnica de μ PCD. Nos resultados obtidos entre estas duas técnicas existe uma discrepância significativa nos tempos de vida medidos, discrepância essa assumida como natural dado que os valores adquiridos são razoáveis tendo em conta que a técnica de μ PCD mede tempos de vida efectivos ao invés da técnica de PL que mede tempos de vida no *bulk* da amostra, sendo de esperar resultados semelhantes somente em situações na qual a amostra se encontraria extremamente bem passivada, o que não foi o caso. De acordo com os resultado obtidos com esta técnica, sugere-se que a fotoluminescência é um método adequado no controlo de qualidade das *wafers* nos produtores das células uma vez que também permite a detecção de limites de eficiência nas regiões mais defeituosas e impuras das extremidades das *wafers*, regiões essas resultantes dos cortes aplicados no inicio da cadeia de produção das células (corte das *wafers* nos lingotes).

Na análise de Fotoluminescência sem se recorrer á técnica dos rácios, tentou-se analisar os tempos de vida das amostras a partir de uma única imagem de luminescência, revelando-se essa tarefa muito complicada tendo em conta todas as variáveis a ter em conta no sistema. Os resultados obtidos neste ponto não se revelaram satisfatórios, dando a querer que existem muitos parâmetros experimentais que necessitam de ser quantificados face ao seu impacto nas medições feitas, levando á necessidade de fazer mais estudos neste tipo de aplicação da técnica. A possibilidade de recorrer nos próximos tempos a uma calibração utilizando os rácios, é um ponto pertinente e de futuro a tomar em conta.

Na técnica de Electroluminescência, foi decidido não aprofundar ao ponto de se caracterizar os tempos de vida do material das células fotovoltaicas, ficando apenas a análise e estudo feito a nível do material desde fissuras, qualidade do material até mesmo de sujidade, passando também pela análise das componentes eléctricas das células, como a implementação e o bom estado dos contactos metálicos (*bus bar* e *fingers*). Para a validação da técnica de EL neste tipo de análise foram utilizadas

um conjunto de células com o objectivo de uma futura aplicação em célula solares de concentração, e para tal aplicação estavam a ser alvo de um estudo de selecção do melhor processo de soldadura dos contactos metálicos, dando assim a oportunidade a esta técnica de se provar a nível industrial. De acordo com a parceria feita nesta experiência, a utilização da EL foi um sucesso permitindo analisar os processos de soldadura mais adequados num reduzido espaço de tempo algo que mais nenhuma outra técnica poderia oferecer, melhorando a eficiência do processo de monitorização de que aquelas células estavam a ser alvo.

Apesar de todo o trabalho elaborado nesta dissertação, ainda existe muito trabalho e estudo a fazer para melhorar o sistema criado para as técnicas de luminescência.

De acordo com o já elaborado na vertente da técnica de Fotoluminescência, ficou ainda algum estudo por fazer, sendo que os seguintes pontos são os que se julgam mais importantes.

- Necessário estudar diferentes alternativas e criar um leque maior de porta amostras de maneira a permitir a análise de células com outras geometrias e dimensões.
- Estudar aprofundadamente todos os parâmetros possíveis de afectar as medições de PL com uma imagem única sem recorrer a nenhum tipo de calibração.
- Conhecer melhor as capacidades da camera e do seu software de maneira a permitir minimizar alguns problemas que surgem nas imagens (anel sombreado no capítulo dos rácios)

Na parte da Electroluminescência que foi a menos explorada a título de caracterização espacial de tempos de vida e de comprimentos de difusão no material, fica algo mais por fazer e melhorar.

- Estudar e testar uma análise de tempos de vida em células através de EL, utilizando a técnica dos rácios e as de imagem individual.
- Procurar implementar um sistema de porta amostras que permita manter as células restringidas a uma posição fixa, permitindo futuramente a utilização da técnica dos rácios.
- Parcerias com empresas do ramo de produção de células para a utilização do equipamento de EL como controlo de qualidade.

Apesar do trabalho conseguido no desenrolar desta dissertação, infelizmente ficou uma série de processos a meio que não me foi possível concluir de maneira a apresentar neste documento. De qualquer maneira, a título pessoal, foi um desafio muito complexo mas acima de tudo gratificante por tudo o que aprendi dentro de todas as áreas envolvidas no desenvolvimento de todo este sistema. Desde o início desta dissertação, vi-me envolvido nas mais diversas áreas, desde a electrónica e instrumentação, metalúrgica, óptica, física dos semicondutores, desenho técnico entre outras tantas, considerando que termino esta dissertação mais enriquecido.

6. Bibliografia

- [1] S. Ahmed et al., “RenewableS 2011,” *Renewable Energy*, 2011.
- [2] R. Castro, *Um Introdução às Energias Renováveis: Eólica, Fotovoltaica e Mini-Hídrica*. 2011.
- [3] IEA, “IEA - International Energy Agency,” 2010. .
- [4] G. Crabtree, *Solar Energy Conversion*. 2007.
- [5] NASA, “NASA - National Aeronautics and Space Administration.” .
- [6] J. Morais, *Sistemas Fotovoltaicos - Da Teoria à Prática*. 2009.
- [7] S.M.Sze, *Semiconductor Devices - Physics and Technology*. 1936.
- [8] “PVEDUCATION-PV Education Network.” .
- [9] S. Filipa and A. Castro, “Modelação de Micro-Sistemas Híbridos Fotovoltaicos / Eólicos para Produção Descentralizada.”
- [10] S. K. Ghandhi, *VLSI Fabrication Principles: Silicon and Gallium Arsenide*. Wiley, 1994.
- [11] A. Jansen, “Characterization of CCDs,” pp. 1-22, 2006.
- [12] M. A. Green and M. J. Keevers, “Optical properties of intrinsic silicon at 300 K,” *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, vol. 3, no. 3, pp. 189-192, 1995.
- [13] P. Würfel, *Physics of Solar Cells - From Principles to New Concepts*. WILEY-VCH, 2005.
- [14] P. Würfel, T. Trupke, T. Puzzer, E. Schäffer, W. Warta, and S. W. Glunz, “Diffusion lengths of silicon solar cells from luminescence images,” *Journal of Applied Physics*, vol. 101, no. 12, p. 123110, 2007.
- [15] D. K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, vol. 44, no. 4. Wiley-Interscience, 2006, p. 779.
- [16] D. H. Macdonald, “Recombination and Trapping in Multicrystalline Silicon Solar Cells,” 2001.
- [17] T. Trupke, R. a. Bardos, M. C. Schubert, and W. Warta, “Photoluminescence imaging of silicon wafers,” *Applied Physics Letters*, vol. 89, no. 4, p. 044107, 2006.
- [18] D. Miguel and R. Pera, “Caracterização de semicondutores para aplicação fotovoltaica ‘ Medição de tempos de vida e comprimentos de difusão de portadores minoritários no silício ’,” 2007.
- [19] C. N. Rodrigues, “Centrais Solares Fotovoltaicas ligadas à rede eléctrica no Edifício Solar XXI,” 2008.
- [20] R. Castro, J. Crispim, and L. Batalha, *Novas Tecnologias Fotovoltaicas: Filmes Finos*. 2010.
- [21] J. Crispim, “Análise de Evolução de I&D no Âmbito de uma Energia Renovável,” ISEG, 2009.

- [22] “NREL-National Renewable Energy Laboratory.”
- [23] R. A. Sinton, “CONTACTLESS CARRIER-LIFETIME MEASUREMENT IN SILICON WAFERS , INGOTS , AND BLOCKS,” *Measurement*, pp. 1-14, 2009.
- [24] D. Hinken, C. Schinke, S. Herlufsen, A. Schmidt, K. Bothe, and R. Brendel, “Experimental setup for camera-based measurements of electrically and optically stimulated luminescence of silicon solar cells and wafers.,” *The Review of scientific instruments*, vol. 82, no. 3, p. 033706, Mar. 2011.
- [25] M. C. Schubert, S. Pingel, M. The, and W. Warta, “Quantitative carrier lifetime images optically measured on rough silicon wafers,” *Journal of Applied Physics*, vol. 101, no. 12, p. 124907, 2007.
- [26] S. Herlufsen, J. Schmidt, D. Hinken, K. Bothe, and R. Brendel, “Photoconductance-calibrated photoluminescence lifetime imaging of crystalline silicon,” *physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters*, vol. 2, no. 6, pp. 245-247, Dec. 2008.
- [27] J. a. Giesecke, M. Kasemann, and W. Warta, “Determination of local minority carrier diffusion lengths in crystalline silicon from luminescence images,” *Journal of Applied Physics*, vol. 106, no. 1, p. 014907, 2009.
- [28] P. Würfel, T. Trupke, T. Puzzer, E. Schäffer, W. Warta, and S. W. Glunz, “DIFFUSION LENGTHS OF SILICON SOLAR CELLS FROM LUMINESCENCE IMAGES,” *Solar Energy*, no. September, pp. 1-4, 2007.
- [29] T. Trupke, J. Nyhus, and J. Haunschild, “Luminescence imaging for inline characterisation in silicon photovoltaics,” *physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 131-137, Apr. 2011.
- [30] S. Herlufsen et al., “Dynamic Lifetime Imaging Based on Photoluminescence Measurements,” *Solar Energy*, pp. 6-10, 2010.
- [31] J. Giesecke et al., “Determination of Minority Carrier Diffusion Lengths in Silicon Solar Cells from Photoluminescence Images,” 2008.
- [32] T. Trupke, R. A. Bardos, and J. Nyhus, “Photoluminescence characterization of silicon wafers and silicon solar cells,” *In Practice*, 2008.

7. Anexos

7.1 Anexo I

Coeficiente de Absorção do Silício

Das propriedades ópticas mais relevantes da análise da tecnologia do silício, o coeficiente de absorção do silício em função do comprimento de onda é o que mais nos interessa para o desenvolvimento deste estudo.

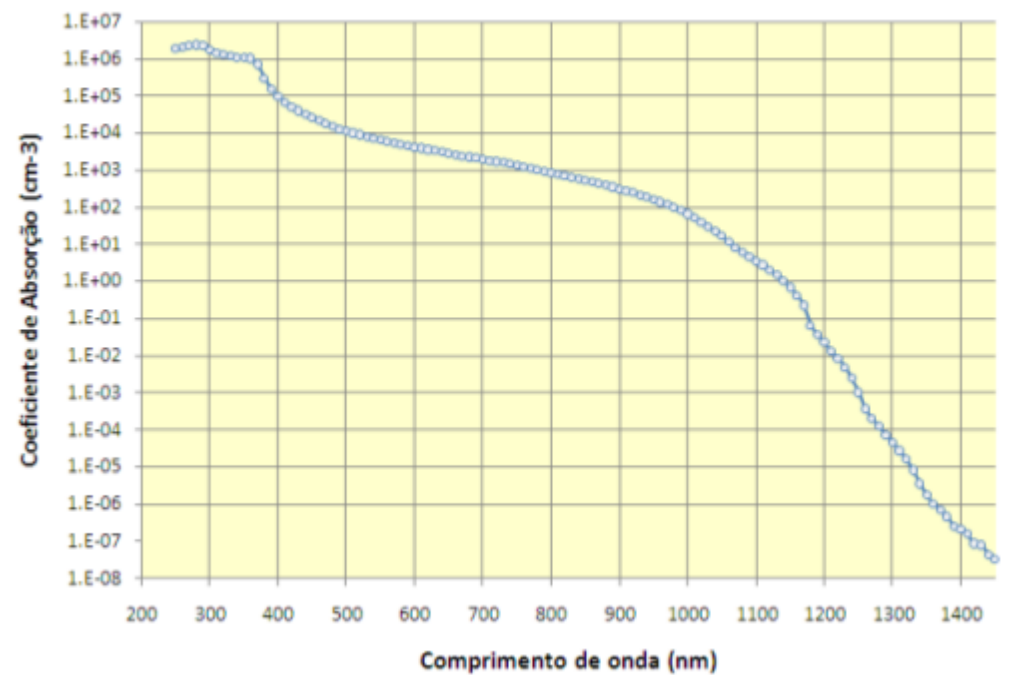


Figura 89 - Coeficiente de absorção do silício em função do comprimento de onda. Medições experimentais feitas a 300K [12].

7.2 Anexo II

Perfil de Distribuição de Portadores de Carga

Para o calculo do perfil de distribuição dos portadores minoritários numa amostra, é necessário recorrer á equação de continuidade relativa á geração e aniquilação de partículas do tipo i . Sendo a equação do tipo:

$$\frac{\delta n_i x}{\delta t} = G_i x - R_i x - \text{div}.j_i x$$

Assumindo que estamos numa condição estacionária, que existe um fonte externa que excita a nossa amostra, que a geração de portadores dentro da nossa amostra é nula ($G_i x = 0$), e que a taxa de recombinação é dada por $R_i x = \frac{n_e x}{\tau}$.

$$\frac{\delta n_i x}{\delta t} = -\frac{n_e x}{\tau} - \text{div}.j_i x = 0$$

Uma vez que a superfície frontal se encontra sobre condições especiais, onde é a mesma superfície de injeção dos portadores em excesso nesta nossa análise, apenas se irá contabilizar a caracterização das condições de fronteira da superfície traseira. Assumindo estas mesmas condições de fronteira especiais, temos que a superfície traseira é caracterizada por uma velocidade de recombinação S de tal maneira que a difusão dos electrões injectados pela fonte externa é dada por,

$$j_e d = -D_e \frac{\delta n_e}{\delta x} d = S n_e d$$

$$\text{div}.j_e x = -D_e \frac{\delta^2 n_e}{\delta x^2} d ,$$

Com D_e a ser o coeficiente de difusão do material semiconductor, a nossa equação de continuidade toma a forma de,

$$0 = D_e \frac{\delta^2 n_e}{\delta x^2} d - \frac{n_e x}{\tau}.$$

Tendo em conta que o tempo é dado por $\tau = \frac{L_e^2}{D_e}$, sendo L_e o comprimento de difusão das nossas partículas, obtemos

$$\frac{\delta^2 n_e}{\delta x^2} - \frac{n_e x}{D_e \tau} = 0$$

$$\frac{\delta^2 n_e}{\delta x^2} - \frac{n_e}{L_e^2} = 0$$

A equação de continuidade neste formato possui uma solução já conhecida, dada por $n_e = e^{mx}$.

$$\frac{\delta n_e}{\delta x} = m \cdot e^{mx} = m^2 \cdot n_e \quad m^2 \cdot n_e = \frac{n_e}{L_e^2} = 0 \quad m \pm \frac{1}{L_e}$$

$$n_e \ 1 = e^{\frac{x}{L_e}}$$

$$n_e \ 2 = e^{-\frac{x}{L_e}}$$

...

$$n_e \ x = A \cdot e^{\frac{x}{L_e}} + B \cdot e^{-\frac{x}{L_e}}$$

Fazendo a substituição na equação de continuidade é possível validar o resultado,

$$\frac{\delta^2 n_e}{\delta x^2} A \cdot e^{\frac{x}{L_e}} + B \cdot e^{-\frac{x}{L_e}} - \frac{A \cdot e^{\frac{x}{L_e}} + B \cdot e^{-\frac{x}{L_e}}}{L_e^2} = 0$$

$$\frac{A}{L_e^2} \cdot e^{\frac{x}{L_e}} + \frac{B}{L_e^2} \cdot e^{-\frac{x}{L_e}} - \frac{A \cdot e^{\frac{x}{L_e}} + B \cdot e^{-\frac{x}{L_e}}}{L_e^2} = 0$$

$$\frac{A}{L_e^2} \cdot e^{\frac{x}{L_e}} + \frac{B}{L_e^2} \cdot e^{-\frac{x}{L_e}} - \frac{A}{L_e^2} \cdot e^{\frac{x}{L_e}} - \frac{B}{L_e^2} \cdot e^{-\frac{x}{L_e}} = 0$$

$$0 = 0$$

Ficando assim provado, a veracidade da solução utilizada.

Sendo A e B constantes, definidas como[14],

$$A = n_e \cdot 0 \frac{1 + r}{1 - r + \frac{1 + r}{1 + r} \cdot e^{\frac{2d}{L_e}}},$$

e

$$B = n_e \cdot 0 \frac{1 + r}{1 + r + \frac{1 - r}{1 - r} \cdot e^{\frac{2d}{L_e}}}$$

com $r = \frac{S \cdot L_e}{D_e}$, ficamos com a seguinte equação do perfil de distribuição,

$$n_e(x) = n_e \cdot 0 \frac{1 + r}{1 - r + \frac{1 + r}{1 + r} \cdot e^{\frac{x}{L_e}}} + \frac{1 + r}{1 + r + \frac{1 - r}{1 - r} \cdot e^{\frac{2d}{L_e}}} \cdot e^{-\frac{x}{L_e}}$$

7.3 Anexo III

Data Sheet da camera HR-320

SPECIFICATIONS:



intelligent Array Sensor Cooled 3.2 Mega-Pixel CCD Camera for High Sensitivity

Parameter	Requirements	Parameter	Specification	Units
CCD architecture	3.2 Megapixel Kodak KAF-3200ME Full-Frame CCD; Transparent ITO gate with on-chip microlenses for increased QE; Low dark current, single output, 100% Fill factor.	Wavelength range (Refer to QE curve)	300-1000	nm
Sensitive area	14.85 mm horiz. x 10.26 mm vert.	Peak quantum efficiency at 600 nm (hermetically sealed with AR coated window)	85	%
CCD pixel resolution (active)	2184 horiz. X 1472 vert.	Full well capacity (Non-Anti-blooming)	55000	e ⁻
Pixel size	6.8 µm x 6.8 µm	No binning		
On-chip binning capability	Unlimited 2-dimensional. CCD readout pattern is user defined and real-time programmable.	Vertical binning (into serial register)	110000	
Camera body dimensions	10 x 13 x 17 cm (without lens adapter and lens)	2-Dimensional binning (unlimited)	110000	
Camera mounting: Suitable for optics tables and embedded systems:	M6-threaded mount on two opposite sides. Spectrograph flanges and "optics and adjustment adapter".	Dark current +25 C	15	e ⁻ / pixel/s
Pixel alignment to mounting flange	Precise alignment to pins available according to application requirements.	Peltier cooled to -35°C	0.010	e ⁻ rms
CCD focal plane	The CCD surface is as far forward as possible, so that it can be placed as close as possible to customers' optics. There is no obstruction caused by the housing protruding beyond the CCD.	Readout noise	12	e ⁻ rms
Optical interfaces	Standard: C-Mount, 100 mm diameter interface, spectrometer flange. Customer-specific optics interfaces. F-Mount adapter.	Digital output resolution	16	bits
Software interfaces	SDK (active X / DLL), SDK Viewer, TWAIN, SamBa Control	Frame readout time full resolution 2-D binning:	6.4 (Note 1)	s
PC interfaces	TCP / IP, Ethernet, UDP, LVDS- Frame grabber	Ethernet data rate (net image data transfer)	1	MB/s
Operating Modes	High quality mode (HQ), fast binning (FBin), high sample rate (HSR)	Camera conversion constant (k)		
Mechanical shutter	Optional integrated	Gain 1:	1.64	e ⁻ /ADU
		Gain 2:	1.2	
		Gain 3:	1.04	
		Gain 4:	0.84	
		Integral non-linearity (digital output vs. optical input, over the full dynamic range)	± 1	%
		Pixel readout rate	500	kpixels
		Dynamic range	78	dB
		Cooling performance (delta-T, 30° ambient to CCD)	60	°C
		Power supply		
		Voltage	12	VDC
		Current	5	A

1) Since readout pattern is fully programmable, higher frame rates at lower resolution are possible.

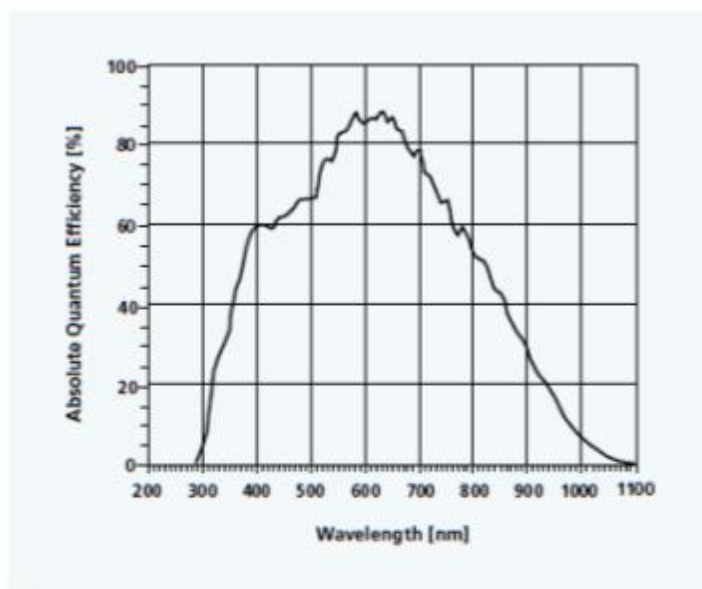
Order information

Order Number	SVS808-MB-1001
--------------	----------------

coolSamBa HR-320

Sensovation reserves the right to make changes to products and documentation without prior notice.

IMAGE SENSOR SPECIFICATION:



Spectral
response
curve

Source: Data Sheet Kodak KAF 3200



coolSamBa HR-320

 Sensovation AG
Ludwigshafener Str. 29
D-78333 Stokach / Germany
Phone: + 49 - 7771 8739 - 0
Fax: + 49 - 7771 8739 - 39
info@sensovation.com
www.sensovation.com

Sensovation Corp.
1301 Shoreway Road, Suite 101
Belmont, CA 94002 / U.S.A.
Phone: 650 - 622 - 2820
Fax: 650 - 622 - 9075
corpinfo@sensovation.com
www.sensovation.com



7.4 Anexo IV

Thermistor-Steinhart Equation

Um termistor é um componente semicondutor na qual a sua resistência varia significativamente com a temperatura, comparativamente com outros componentes de resistências.

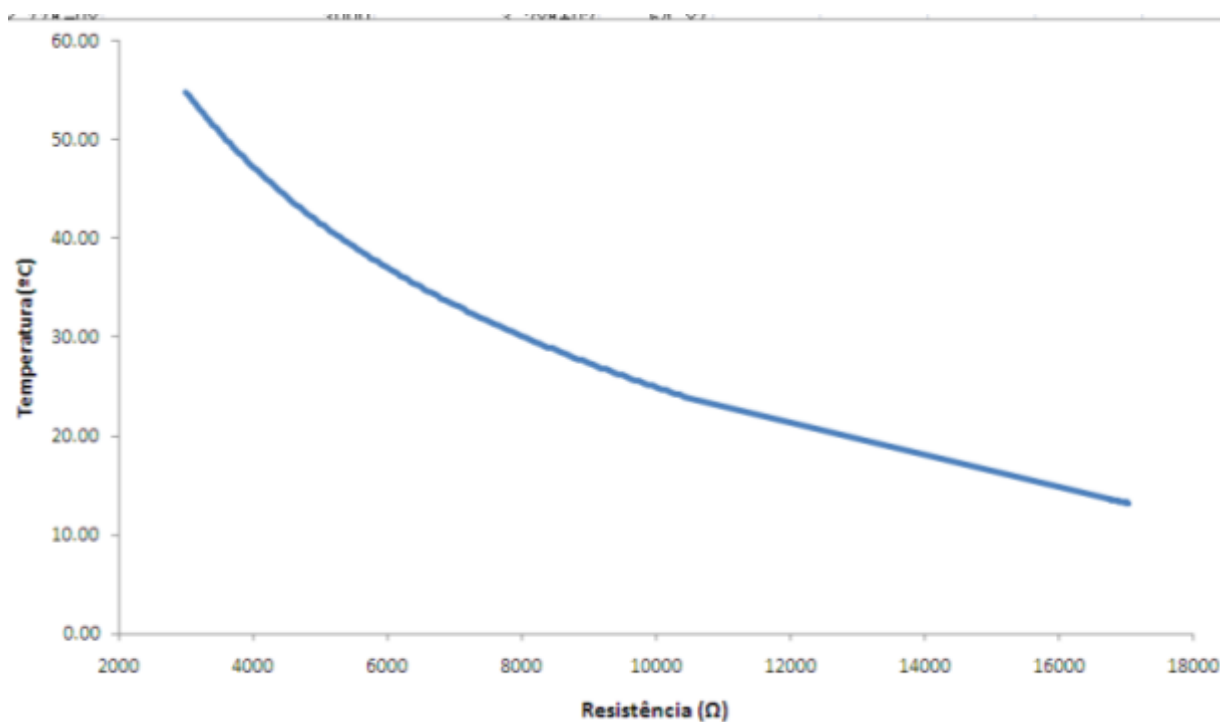
A equação de Steinhart-Hart é um modelo que relaciona a resistência medida de um material semicondutor para diferentes temperaturas, sendo dada pela seguinte equação:

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln R + c \cdot \ln^3(R)$$

Assumindo T como sendo a temperatura em graus Celsius (°C), R a resistência para uma temperatura em Ohms (Ω) e os coeficientes de Steinhart-Hart a , b e de c são factores variáveis com o tipo e modelo do termistor usado e a gama de temperaturas de operação.

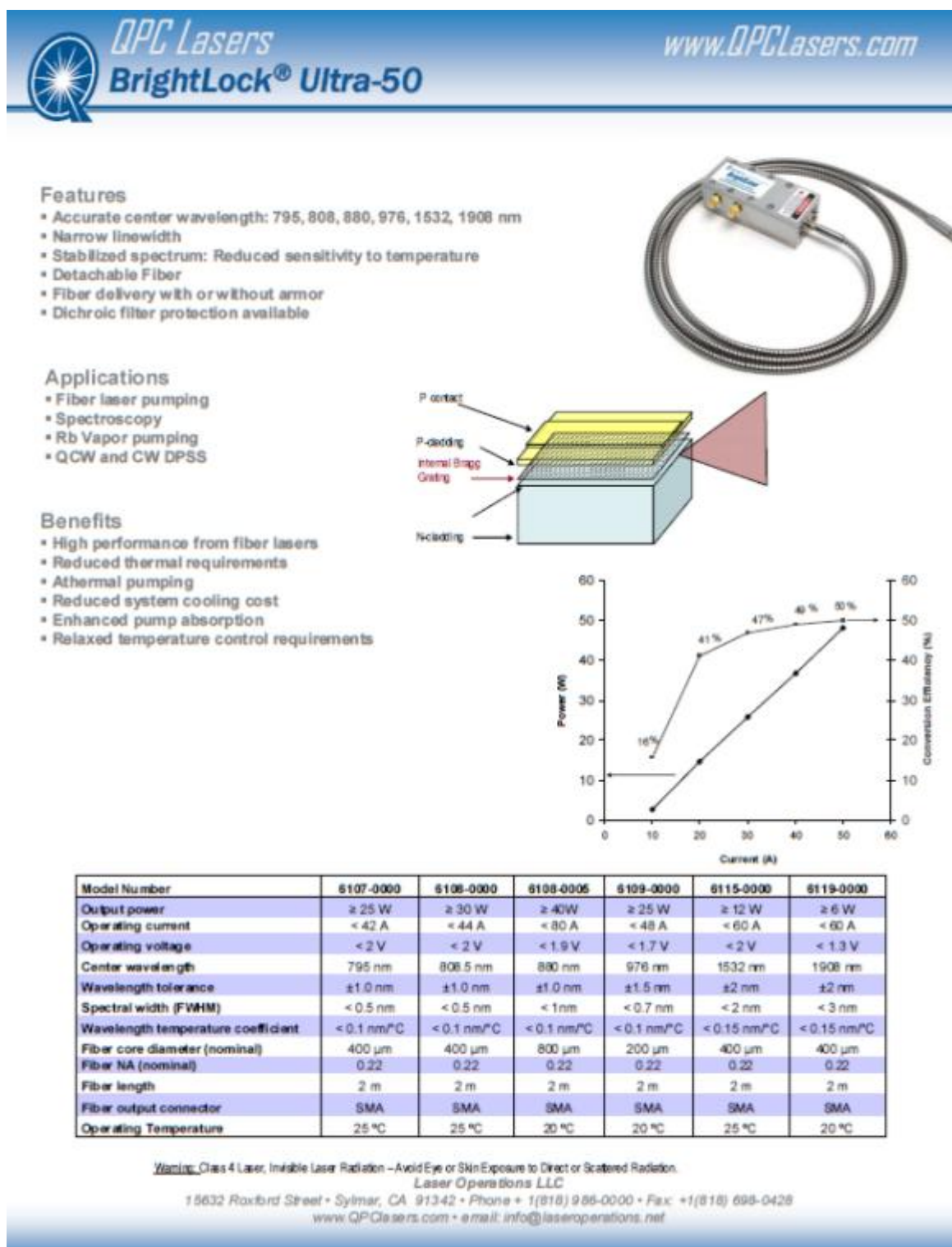
Tabela 13 - Coeficientes da Equação de Steinhart-Hart

Coeficiente a	Coeficiente b	Coeficiente c
0.001129148	0.000234125	8.77×10^{-8}




7.5 Anexo V

Data Sheet do Laser




7.6 Anexo VI

Data Sheet dos óculos de protecção



Laser Safety Glasses



LG9


Description

The LG series of laser safety glasses provide CE certified laser radiation protection. The comfortable frame style can be used over the top of prescription lenses and has top and side shields to protect the user's eyes from peripheral laser radiation. The interior dimensions of the LG series of laser goggles are 145 mm x 53 mm and have a 140 mm temple. The lenses have a diagonal length of 68 mm. Each pair of laser safety glasses comes with a protective storage case, a slip on neck strap, and a cleaning cloth.

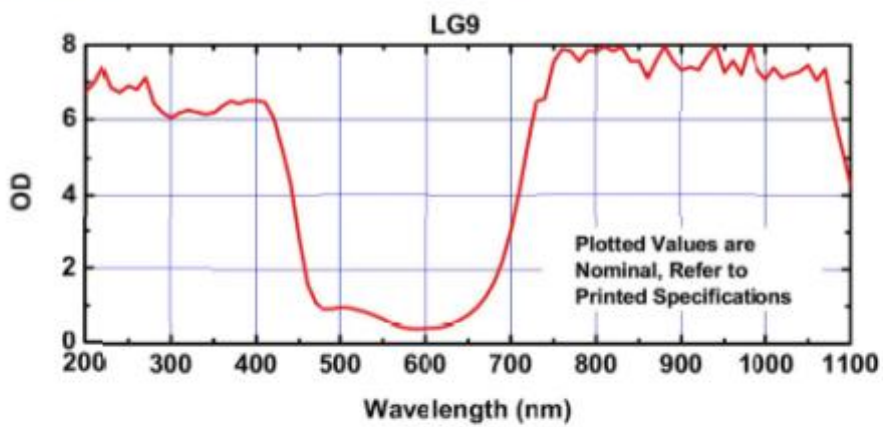
Specifications

Specification	Value
Luminous Transmittance	25%
Optical Density	
180 - 400 nm	6+
720 - 1090 nm	5+
750 - 1064 nm	7+

Specification	Value
L-Rating	
180 - 315 nm	D LB6
180 - 315 nm	R LB4
>315 - 400 nm	DR LB4
720 - 725 nm	DM LB5
720 - 750 nm	IR LB5
>725 - 1075 nm	DM LB6
>750 - 1064 nm	IRM LB7
>1064 - 1075 nm	IR LB5



Graph



Plotted Values are Nominal, Refer to Printed Specifications

US, Canada, & South America: +1-973-579-7227 | Europe: +49 (0) 8131-5956-0 | UK & Ireland: +44 (0)1353-654440
 France: +33 (0) 970 444 844 | Scandinavia: +46-31-733-30-00 | Japan & Asia: +81-3-5979-8889 | China: +86 (0)21-60561122

August 9, 2011
13061-S01, Rev C

www.thorlabs.com

7.7 Anexo VII

Data Sheet da fonte do laser



QPC Lasers
Ultra-Drive Basic Series

www.QPCLasers.com

Features

- Safety interlocks
- Advanced control & monitoring functions
- Soft start circuitry
- User settable parameters
- Data logging with one-click data export
- Power calibration
- User-friendly software interface





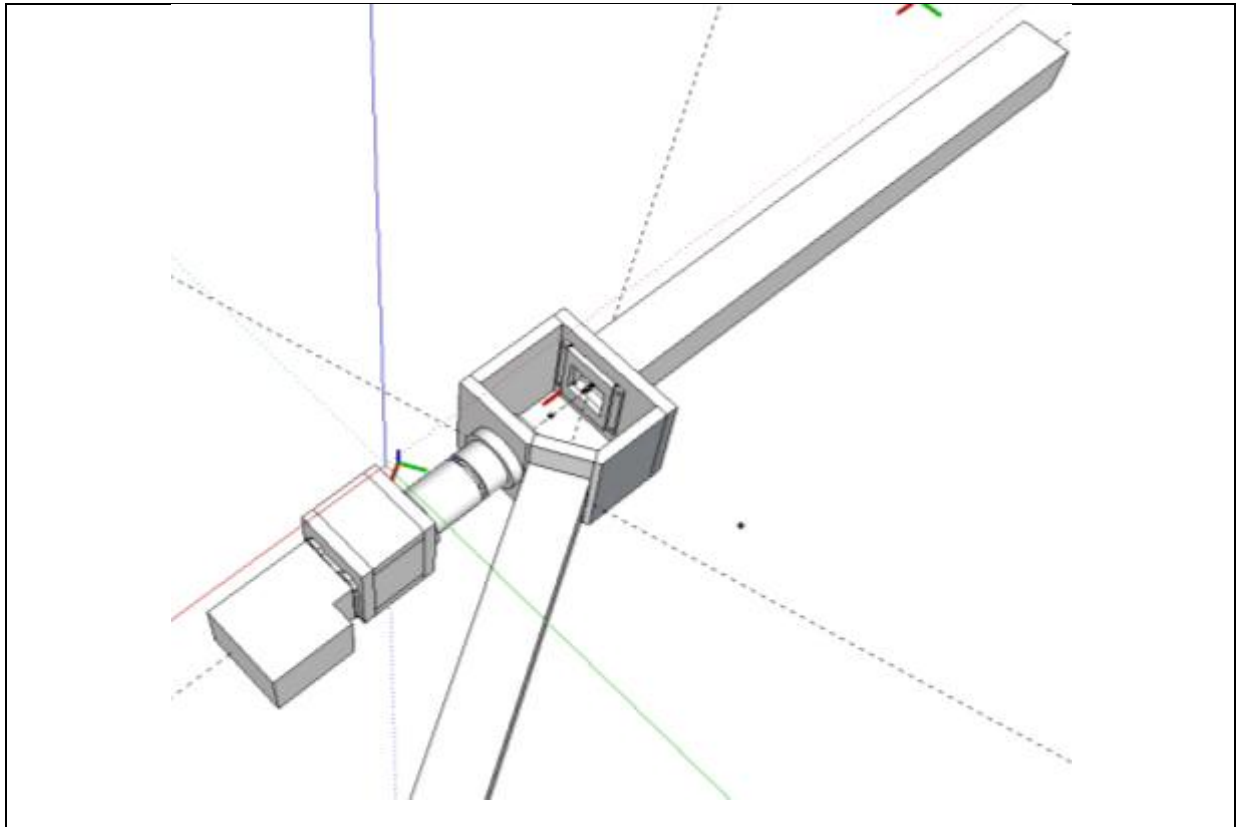
Model Number	9001-0002	9001-0004
Output		
Output Current	70A	64A
Output Current Resolution		
Noise/ripple	0.20% RMS	0.20% RMS
Compliance Voltage @ Max Current	5.0V at output	5.0V at output
Laser Voltage Measurement Range	0-7.5 V	0-7.5 V
Laser Voltage Measurement Resolution	0.0005	0.0005
Laser Voltage Measurement Accuracy	0.02	0.02
Monitor Inputs		
Light-loop/monitor Input Signal Range	0-2 mA or 0-2.5 V factory settable	0-2 mA or 0-2.5 V factory settable
Light-loop Input Signal Resolution	0.03% FS	0.03% FS
Light-loop Input Signal Accuracy	User calibrated software interface	User calibrated software interface
Temperature Sensor (not included)	NTC 10K Ω	NTC 10K Ω
Temperature Resolution	0.03° C typical	0.03° C typical
Temperature Accuracy	User calibrated	User calibrated
Pulsed Operation		
Pulse Rate	1kHz, max.	1kHz, max.
Rise Time	170nsec, nominal	170nsec, nominal
Pulse Width	User settable	User settable
External Trigger	TTL, edge trigger	TTL, edge trigger
External Bias Control	0-2.5V	0-2.5V
Connectors		
Data	RS-232, DB-9 or USB-B	RS-232, DB-9 or USB-B
External Trigger and Bias Control	SMB	SMB
Output	DB37 female, mixed pin	DB37 female, mixed pin
Optional Output Cable, 1 Meter	DB37 male, one end only	DB37 male, one end only
General		
Input Power	90-264 VAC	90-264 VAC
Frequency	47-62 Hz	47-62 Hz
Current	<8.5 amp max	<8.5 amp max
Power Factor	0.95	0.95
Efficiency	0.8	0.8
EMI	Designed to meet FCC-B	Designed to meet FCC-B
Operating Temperature	0° C to 40° C, non-condensing	0° C to 40° C, non-condensing
Dimensions (HxWxD)	3.8" x 6.3" x 11.8"	3.8" x 6.3" x 11.8"

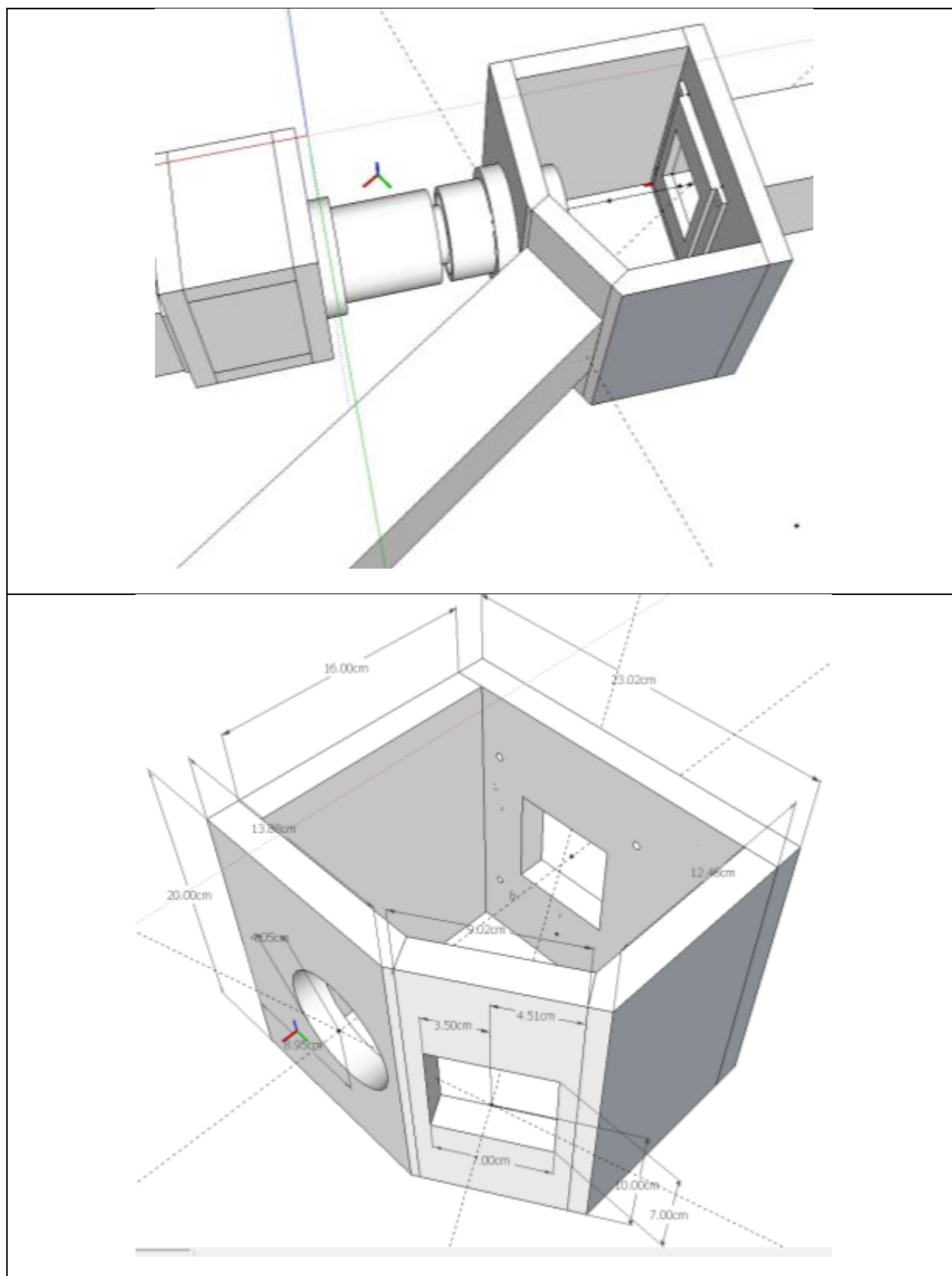
Warning: Class 4 Laser, Invisible Laser Radiation – Avoid Eye or Skin Exposure to Direct or Scattered Radiation.
Laser Operations LLC

7.8 Anexo VIII

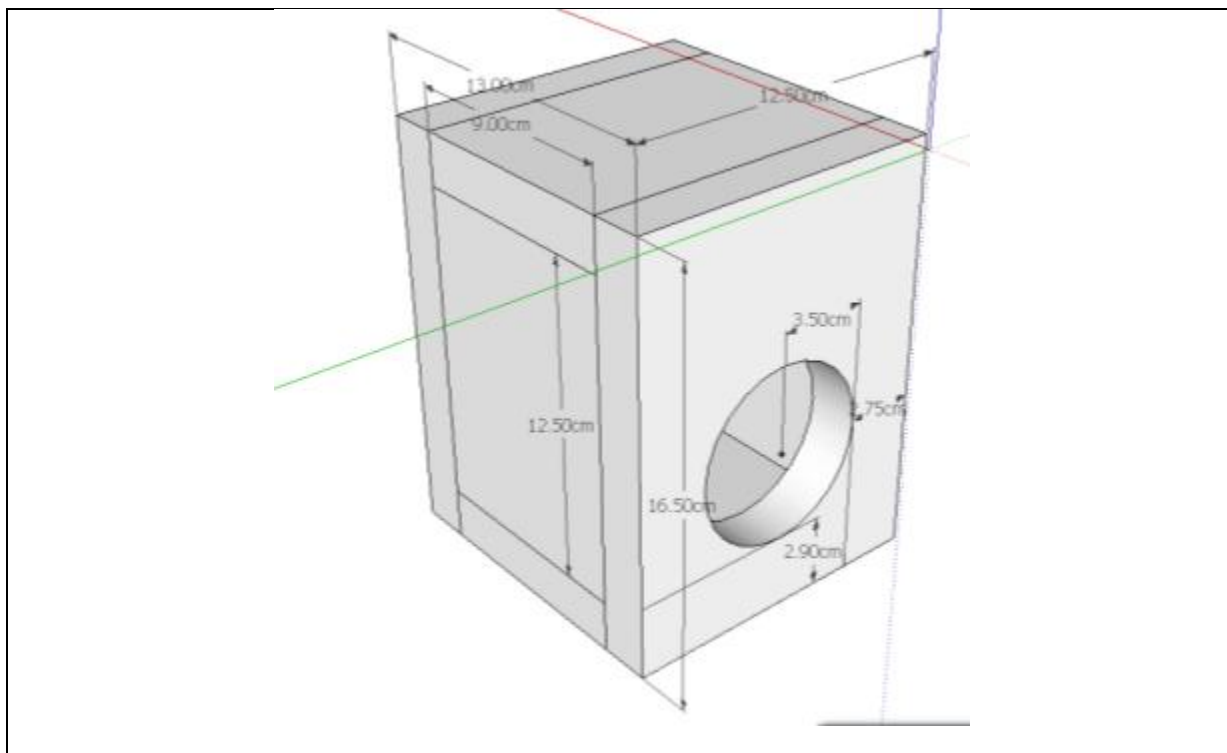
Desenho da caixa estanque

Desenho da caixa estanque inserida no sistema, com capacidade para suportar as duas metodologias de injeção. Injecção frontal e traseira.





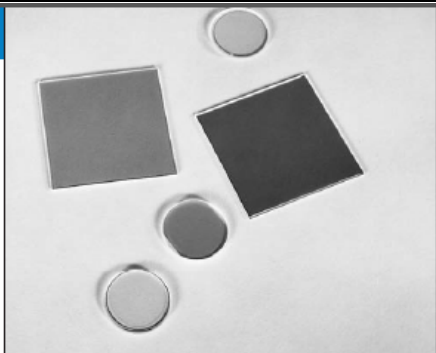
Desenho e medidas da estrutura da caixa estanque..



Desenho e medidas da caixa de ligação entre a camera CCD e a caixa estante. Dentro desta interface vai se encontrar a objectiva da camera.

7.9 Anexo IX

Data Sheet dos Filtros



Optical Components

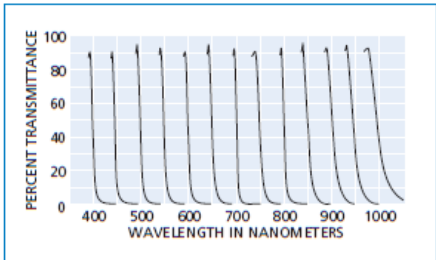
Ask About Our Build-to-Print and Custom Capabilities

DEM

Dielectric Shortpass Filters

CVI Melles Griot all dielectric longpass and shortpass filters, also called edge filters, have sharp cutoff transitions from reflection to transmission. Shortpass filters transmit light at wavelengths shorter than the cutoff wavelength and reflect longer wavelengths. Longpass filters reflect the shorter wavelengths and transmit the longer ones.

- The filters have a steep cutoff edge.
- They are useful for attenuating specific wavelengths.
- They are available in 50-nm increments from 400 to 1000 nm.



Typical transmittance curves for dielectric shortpass filters

Dielectric Shortpass Filters, Round

50% Cutoff Wavelength (nm)	Typical Rejection Range (nm)	Typical Transmission Range (nm)	PART NUMBER
400	420–470	285–390	FSWP-400-25.0M
450	470–530	310–440	FSWP-450-25.0M
500	525–610	340–485	FSWP-500-25.0M
550	570–680	375–540	FSWP-550-25.0M
600	620–790	400–585	FSWP-600-25.0M
650	675–850	400–640	FSWP-650-25.0M
700	720–980	400–685	FSWP-700-25.0M
750	780–970	400–735	FSWP-750-25.0M
800	830–1030	400–785	FSWP-800-25.0M
850	880–1100	425–835	FSWP-850-25.0M
900	940–1150	425–885	FSWP-900-25.0M
950	980–1200	450–930	FSWP-950-25.0M
1000	1040–1250	450–980	FSWP-1000-25.0M

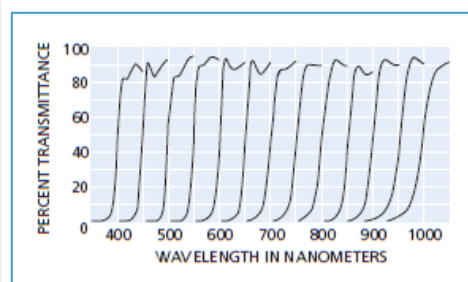
SPECIFICATIONS: Dielectric Shortpass Filters

Dimensions	Round	25.0 mm ± 0.15 mm
	Square	50.0 mm × 50.0 mm ± 0.25 mm
Thickness		1.5 mm ± 0.5 mm
Surface Quality		80-50 scratch and dig
Operating Temperature		– 20°C to + 200°C
Clear Aperture		21 mm for round, 90% of edge dimensions for square filters
Parallelism		15 arc seconds
Optical Material		UV-grade synthetic fused silica
Transmitted Wavefront Error		1λ per 25-mm area over clear aperture
Cutoff Tolerance		± 10 nm
Angle of Incidence		0°
Transmission		85% average over specified wavelength range
Rejection		99% average
Coating		Dielectric hard coating on front surface. Antireflection coating R _s 0.75% over transmission range on back surface.

Dielectric Shortpass Filters, Square

50% Cutoff Wavelength (nm)	Typical Rejection Range (nm)	Typical Transmission Range (nm)	PART NUMBER
400	420–470	285–390	FSWP-400-50.0 × 50.0M
450	470–530	310–440	FSWP-450-50.0 × 50.0M
500	525–610	340–485	FSWP-500-50.0 × 50.0M
550	570–680	375–540	FSWP-550-50.0 × 50.0M
600	620–790	400–585	FSWP-600-50.0 × 50.0M
650	675–850	400–640	FSWP-650-50.0 × 50.0M
700	720–930	400–685	FSWP-700-50.0 × 50.0M
750	780–970	400–735	FSWP-750-50.0 × 50.0M
800	830–1030	400–785	FSWP-800-50.0 × 50.0M
850	880–1100	425–835	FSWP-850-50.0 × 50.0M
900	940–1150	425–885	FSWP-900-50.0 × 50.0M
950	980–1200	450–930	FSWP-950-50.0 × 50.0M
1000	1040–1250	450–980	FSWP-1000-50.0 × 50.0M

Dielectric Longpass Filters



Typical transmittance curves for dielectric longpass filters

SPECIFICATIONS: Dielectric Longpass Filters

Dimensions	Round 25.0 mm + 0/- 0.5 mm Square 50.0 mm x 50.0 mm ± 0.25 mm
Thickness	4.0 mm maximum
Surface Quality	80-50 scratch and dig
Operating Temperature	- 50°C to + 100°C
Clear Aperture	95% of dimension
Parallelism	3 arc minutes
Optical Material	BK7
Transmitted Wavefront Error	3 to 5 λ per 20 mm over clear aperture
Cutoff Tolerance	± 10 nm
Angle of Incidence	0°
Transmission	85% average from the 50% cut-off point
Rejection	≥99% from the 50% cut-off point
Coating	Dielectric hard coating on front surface. Antireflection coating R≤ 0.75% over transmission range on back surface.

Dielectric Longpass Filter, Round

50% Cutoff Wavelength (nm)	Typical Rejection Range (nm)	Typical Transmission Range (nm)	PART NUMBER
400	360-200	420-2000	FLWP-400-25.0M
450	405-200	470-2000	FLWP-450-25.0M
500	450-200	520-2000	FLWP-500-25.0M
550	495-200	540-2000	FLWP-550-25.0M
600	540-200	620-2000	FLWP-600-25.0M
650	585-200	670-2000	FLWP-650-25.0M
700	630-200	720-2000	FLWP-700-25.0M
750	675-200	770-2000	FLWP-750-25.0M
800	720-200	820-2000	FLWP-800-25.0M
850	765-200	870-2000	FLWP-850-25.0M
900	810-200	920-2000	FLWP-900-25.0M
950	855-200	975-2000	FLWP-950-25.0M
1000	900-200	1025-2000	FLWP-1000-25.0M

Dielectric Longpass, Square

50% Cutoff Wavelength (nm)	Typical Rejection Range (nm)	Typical Transmission Range (nm)	PART NUMBER
400	360-200	420-2000	FLWP-400-50.0 x 50.0M
450	405-200	470-2000	FLWP-450-50.0 x 50.0M
500	450-200	520-2000	FLWP-500-50.0 x 50.0M
550	495-200	540-2000	FLWP-550-50.0 x 50.0M
600	540-200	620-2000	FLWP-600-50.0 x 50.0M
650	585-200	670-2000	FLWP-650-50.0 x 50.0M
700	630-200	720-2000	FLWP-700-50.0 x 50.0M
750	675-200	770-2000	FLWP-750-50.0 x 50.0M
800	720-200	820-2000	FLWP-800-50.0 x 50.0M
850	765-200	870-2000	FLWP-850-50.0 x 50.0M
900	810-200	920-2000	FLWP-900-50.0 x 50.0M
950	855-200	975-2000	FLWP-950-50.0 x 50.0M
1000	900-200	1025-2000	FLWP-1000-50.0 x 50.0M